

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA COLECTORES
SOLARES DE PLACA PLANA CON MIRA A SU APROVECHAMIENTO EN
PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN EN FRUTAS Y VERDURAS.**



BRIAN ROY CABRERA ROJAS

JUAN HUMBERTO SOTTER BOTERO.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERIA MECANICA

MONTERIA, CÓRDOBA

2019.

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA COLECTORES
SOLARES DE PLACA PLANA CON MIRA A SU APROVECHAMIENTO EN
PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN EN FRUTAS Y VERDURAS.**



BRIAN ROY CABRERA ROJAS

JUAN HUMBERTO SOTTER BOTERO.

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de trabajo de investigación y
extensión, como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.**

Director(es):

ARNOLD RAFAEL MARTÍNEZ GUARIN

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERIA MECANICA

MONTERIA, CORDOBA

2019.

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

NOTA DE ACEPTACIÓN

ARNOLD RAFAEL MARTÍNEZ GUARIN

Director

OSCAR JAIRO PERALTA VERGARA

Jurado

WILLIAN CÉSAR BELTRAN GALINDO

Jurado

DEDICATORIA

Te lo dedico a ti papá por ser la persona que nunca me ha dejado solo, aunque en algunos momentos no estas conmigo físicamente se que piensas en mi y tus pensamientos siempre me hacen compañía. A mi hijo el pequeño Thomas por darme la motivación cada mañana al levantarme y cada noche al acostarme eres la persona que nunca dejara de ser importante para mí. A su mama Wendy ya que ella me ha brindado el apoyo incondicional en cualquier situación ese es el mayor acto de cariño que se puede tener con otra persona. “Con el hombre esto es posible, con Dios todo es posible”.

Juan Humberto Sotter Botero

Le dedico este logro a todas las personas que con mucho o poco han aportado para hacer esto realidad, sin ustedes esto no hubiese sido posible.

Brian Roy Cabrera Rojas

AGRADECIMIENTOS

A Dios en primer lugar por permitirme obtener el triunfo en este proyecto, a mi padre Pedro Juan Sotter López por ser la persona que más apoyo me brindó en todos los aspectos, tuvo paciencia y se esmeró por siempre atender mis necesidades este título también le pertenece a él. A mi hermano le agradezco por ayudar a programar una parte de mis sueños y a mi hermana por atender cualquier necesidad que le comentase. Quiero extender este agradecimiento a todas aquellas personas que algún día me brindaron un vaso con agua o un bocado de comida, en especial a la familia Diaz Ávila a mi madre adoptiva Uberlinda y a mi gran amigo Álvaro Díaz del cual nunca salió una respuesta negativa para la consecución de mis metas, gracias. A mi director Arnold Rafael Martínez por soportar diariamente mis insistentes ganas de salir adelante y ayudarme no solo en mi formación académica, también en mi formación como persona.

Juan Humberto Sotter Botero

En primer lugar, a Dios por darme la oportunidad de llegar a este momento, por forjarme cada día para ser mejor persona, por los momentos duros y por los felices, por las dificultades y por las personas que con una voz de aliento me mostraban que él estaba conmigo.

A mi familia por ser el punto de partida para este sueño, darme su apoyo y cariño, sin importar la distancia siempre me hicieron sentir acompañado.

A Margarita González por acompañarme en esta lucha de tanto tiempo sin desfallecer, dándome su amor y apoyo incondicional. ¡Gracias! Por enseñarme a ser mejor cada día.

A mi director por creer en mi y en mis capacidades.

A mi compañero por ser fuerte en las adversidades, por su esfuerzo, por ser un hermano de otra madre, por confiar y nunca perder la esperanza.

A mi director Arnold Rafael Martínez por creer en mi y darme la oportunidad y el camino para llegar a este momento.

Brian Roy Cabrera Rojas

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	16
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
1.1. MARCO TEÓRICO.....	17
1.1.1. Energía solar	17
1.1.2. Energía solar directa	18
1.1.3. Energía solar Fotovoltaica	18
1.1.4. Energía solar Térmica	18
1.2. COLECTORES TÉRMICOS	19
1.2.1. Colector Solar De Placa Plana	20
1.2.2. Captadores Solares De Aire	20
1.3. SISTEMAS DE CONTROL.....	21
1.4. TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL.	21
2. MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1. DETERMINACIÓN DE VARIABLES DEL PROCESO	23
2.2. Modelado del colector solar de placa plana	23
2.4. SISTEMA DE CONTROL.....	41
3. IMPLEMENTACION Y VALIDACION.	52
3.1. VALIDACION DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL.	54
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	55
4.1. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	55
4.1.1. Modelado del colector solar	55
4.1.2. prueba experimental.....	58
4.2. Simulación del modelo	61
4.3. MARCO DE ANÁLISIS	64
4.4. PRUEBA DE T-STUDENT	65
4.5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	67
4.5.2. Prueba de hipótesis	68
5. CONCLUSIONES	70

6. RECOMENDACIONES.	71
7. BIBLIOGRAFÍA	72

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. TIPOS DE COLECTORES SOLARES DE AIRE. FUENTE: AUTOR, 2019.....	23
FIGURA 2. COMPORTAMIENTO DE RADIACIÓN EN COLECTOR SOLAR. FUENTE: AUTOR, 2019.....	26
FIGURA 3. ESQUEMA CUBIERTA DE VIDRIO. FUENTE: AUTOR, 2019.....	27
FIGURA 4. PLACA Y RADIACIÓN INCIDENTE. FUENTE: AUTOR, 2019.....	27
FIGURA 5. SEGUNDA ILUSTRACIÓN EN EL VIDRIO DEL CALOR. FUENTE: AUTOR, 2019.....	28
FIGURA 6. SEGUNDA ILUSTRACIÓN EN LA PLACA DEL CALOR. FUENTE: AUTOR, 2019.....	28
FIGURA 7. REPRESENTACIÓN LINEAL CON RELACIÓN A PARÁMETROS VARIABLES. FUENTE: AUTOR, 2019.....	42
FIGURA 8. ESQUEMA LAZO CERRADO. FUENTE: AUTOR, 2019.....	42
FIGURA 9. MÉTODO GRAFICO DE ZIEGLER Y NICHOLS. TOMADA DE: REGLAS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES DE ZIEGLER Y NICHOLS, 2017.....	43
FIGURA 10. CONTROLADOR COMPLETO. FUENTE: AUTOR, 2019.....	45
FIGURA 11. ARDUINO MEGA 2560 R3 FUENTE:	46
FIGURA 12. SENSOR DHT11	47
FIGURA 13 CONEXIÓN SENSOR DHT11 A ARDUINO MEGA.....	48
FIGURA 14 ELECTROVÁLVULA DE PLÁSTICO 12V 1/2" SIN PRESIÓN.....	49
FIGURA 15 ELECTRO BOMBA.....	49
FIGURA 16 CIRCUITO DE CONTROL ELECTRO BOMBA Y ELECTRO VÁLVULA.....	50
FIGURA 17 LÁMINA GALVANIZADA CALIBRE 20	51
FIGURA 18 RESTAURACIÓN DE COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA	52
FIGURA 19 ILUSTRACIÓN SERPENTÍN PARA COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA	53
FIGURA 20 SISTEMA CON SERPENTÍN Y RESERVORIO DE AGUA.....	53
FIGURA 21 SISTEMA COMPLETO CON TODAS LAS PARTES FÍSICAS Y ELECTRÓNICAS.	54
FIGURA 22. GRAFICA DE LECTURA DE TEMPERATURAS SIN LA ESTRATEGIA DE CONTROL. FUENTE: AUTOR, 2019.....	59
FIGURA 23 ESQUEMA DEL MODELO EN SIMULINK DE MATLAB.	61
FIGURA 24 GRAFICO DE SIMULACIÓN EN SIMULINK DE MATLAB.....	62
FIGURA 25 DATOS CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL IMPLEMENTADA. FUENTE: AUTOR, 2019.....	63
FIGURA 26 SUPERPOSICIÓN DE LAS GRÁFICAS SIN ESTRATEGIA DE CONTROL Y CON ESTRATEGIA DE CONTROL. FUENTE: AUTOR, 2019.....	64
FIGURA 27 RUTA DE PRUEBA T-STUDENT. FUENTE: AUTOR, 2019.....	65

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. PARÁMETROS FIJOS Y TRANSITORIOS.....	24
TABLA 2. CONSTANTES ACORDES AL TIPO DE CONTROLADOR.	44
TABLA 3 PARÁMETROS FIJOS REALES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO	58
TABLA 4. DATOS SIN ESTRATEGIA DE CONTROL.	60
TABLA 5 DATOS CON ESTRATEGIA DE CONTROL.	63
TABLA 6. ESTADÍSTICAS DE RESUMEN PARA LA VARIABLE TEMPERATURA DE SALIDA.	68

RESUMEN

El uso de energía solar ha tomado fuerza a través de los últimos años como alternativa energética para el remplazo de fuentes de energías convencionales, sumado a esto que con el uso de la energía solar se mitiga el daño ambiental, con la ayuda de los diversos avances tecnológicos se tecnifican los procesos para el aumento de la eficiencia de los instrumentos que permitan el aprovechamiento de dicha energía.

En este trabajo se desarrolló una estrategia de control y un sistema físico, enlazados entre sí, que permitan con la energía proveniente del sol en forma radiación mantener una temperatura a la salida de un colector solar de placa plana dentro de un rango específico, utilizando el software Simulink de Matlab se programó el desarrollo analítico de la función de transferencia obtenida para el cálculo del colector solar en estudio y por medio de una tarjeta microcontroladora llamada Arduino mega se le ordena al sistema físico que hacer ante las condiciones fluctuantes del ambiente.

El rango de trabajo del colector es de $60\pm 5^{\circ}\text{C}$, la estrategia de control previamente programada en Simulink se encargará de recibir las diferentes temperaturas medidas por los sensores y aportar fluido caliente o fluido frío en función de la temperatura de salida.

Se realizaron pruebas en diferentes días con la estrategia de control implementada y sin la estrategia de control, se obtuvieron lecturas de aproximadamente cinco horas solares, y posteriormente se hizo un análisis estadístico para determinar los efectos que tuvo la implementación de la estrategia de control.

Lo que arrojó una disminución del coeficiente de variabilidad de un 12% que se calculó sin la estrategia de control a un 3% con la estrategia de control implementada, según

criterios estadísticos propios del método usado para el análisis estadístico (t-student) se acepta el sistema y es viable su implementación.

Palabras clave: energía solar, colector solar de placa plana, Arduino mega, Simulink de Matlab, estrategia de control, coeficiente de variabilidad.

ABSTRACT

The use of solar energy has gained strength in recent years, as an energy alternative for the replacement of conventional energy sources, added to this that with the use of solar energy mitigates environmental damage, with the help of various advances Technological processes are technified to increase the efficiency of the instruments that allow the use of this energy.

In this work a control strategy and a physical system linked to each other were developed, which allow the radiation from the sun in radiation form to maintain a temperature at the exit of a flat panel solar collector within a range, using Simulink software From Matlab the analytical development of a heat transfer function was programmed and by means of a microcontroller card called Arduino mega the physical system is instructed to do in the face of fluctuating ambient conditions.

The working range of the collector is 60 ± 5 ° C, the control strategy previously programmed in Simulink will be responsible for receiving the different temperatures measured by the sensors and providing hot fluid or cold fluid depending on the output temperature.

Tests were carried out on different days without the control strategy implemented and without the control strategy, readings of approximately five solar hours were obtained, and subsequently a statistical analysis was made to determine the effects of the implementation of the control strategy.

What resulted in a decrease of the coefficient of variability of 12% that was calculated without the control strategy to 3% that was calculated with the control strategy implemented, according to statistical criteria typical of the method used for statistical analysis (t-student) the system is accepted and its implementation is profitable.

Keywords: solar power, flat plate solar collector, Arduino mega, Matlab Simulink, control strategy, coefficient of variability.

INTRODUCCIÓN

Anualmente se pierden y desperdician 1.300 millones de toneladas de alimentos a nivel mundial, correspondiente al 33% de la demanda total. Perdiéndose en América latina hasta 55% de la producción de frutas y legumbres en procesos como agricultura, procesamiento, postcosecha, distribución y consumo (FAO, 2016). Luego que estos periodos pasan se da un tiempo de escases postcosecha, desencadenando así la disminución en los niveles de productividad y pérdidas económicas.

En estudios recientes, en Colombia para el año 2010 se perdieron y desperdiciaron aproximadamente 1.426.932 toneladas de frutas y verduras en la etapa de postcosecha (DNP, 2016). Este tiempo limitado de abundancia sobrepasa el consumo de estas, con lo cual surge la necesidad de prolongar la vida de las diversas materias primas en sus periodos de abundancia optando por opciones como el secado. El secado es un proceso mediante el cual se somete la fruta o verdura a unas condiciones fijas de temperatura y circulación de aire, conservando propiedades organolépticas, retirándole la humedad y aumentando el tiempo de conservación. sumado a esto se cuenta con condiciones que debido a la ubicación geográfica del país se pueden explotar al máximo como lo es la energía solar. De esta energía limpia, solo es aprovechada un 22% del consumo total, amarrado a esto los avances tecnológicos producto de las arduas investigaciones permiten la realización de un sistema combinado de secado. De esta forma se extiende la vida y cuando pasa el tiempo de sobreproducción se cuenta con la materia almacenada mejorando la calidad de alimentación de las personas y a su vez la calidad de vida (UPME, 2015).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un sistema de control para colectores solares de placa plana con miras a su aprovechamiento en procesos de deshidratación en frutas y verduras.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un modelo analítico del proceso de transferencia de calor en el interior del colector solar de placa plana para la determinación de la función de transferencia.
- Diseñar la estrategia de control que permita garantizar la temperatura de salida en operación.
- Validar el sistema de control en un colector real en operación.

1. REVISIÓN DE LITERATURA.

1.1. MARCO TEÓRICO

1.1.1. Energía solar

La energía solar, es la energía radiante del sol recibida por la tierra. Como recurso energético terrestre, es una gran fuente de energía, aunque su aprovechamiento presente varias desventajas (ONUDI, 2016). Dentro de las características más importantes tenemos que es una fuente de energía renovable, inagotable y su utilización es libre de contaminación, sin embargo, la disponibilidad del recurso solar este dado por la ubicación geográfica y las condiciones atmosféricas. Colombia es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; debido a su posición en la zona tórrida (Murcia, 2009).

La radiación solar está constituida por una superposición de ondas electromagnéticas cuya longitud de onda están comprendidas entre 0,25 micras y 4 micras. Cuanto menor es la longitud de onda mayor es la energía asociada a la onda. Los rayos infrarrojos calientan la materia en cuanto entran en contacto con ella, lo mismo que los ultravioletas, pero estos últimos son mucho menos en cantidad. La cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre en menos de dos semanas, es equivalente a la de todas las reservas conocidas de combustibles fósiles. Se estima que un total de $1,5 \times 10^{15}$ mega watt por año, aproximadamente 2500 veces la energía generada por el hombre por medio de todas las formas convencionales, evitando los problemas de radiación que ellas provocan (DECO, 2016).

La energía solar tiene dos desventajas:

- Es una energía muy difusa, es decir que la cantidad que llega a la Tierra por unidad de tiempo y por unidad de área es muy pequeña, lo que obliga a recogerla y concentrarla.
- Es intermitente, ya que el Sol está disponible solamente durante el día y frecuentemente es oscurecido por las nubes, lo cual obliga a almacenar su energía para poder disponer de ella en forma continuada (Delgado Aguilera, 2007).

1.1.2. Energía solar directa

Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar. Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple. Secado de granos, por ejemplo.

1.1.3. Energía solar Fotovoltaica

Se llama “fotovoltaica” la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico (Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. & Asociación Nacional de Industriales., 2017).

1.1.4. Energía solar Térmica

Se denomina “térmica” la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio. Con respecto a la tecnología solar térmica que convierte la energía radiactiva en calor, su principal componente es el captador, por el cual circula un fluido que absorbe la energía radiada del sol. De acuerdo a la temperatura

de aprovechamiento se puede clasificar el aprovechamiento en de alta, media y baja, siendo sus límites (Torres-Gallo, Miranda-Lugo, & Martínez-Padilla, 2018).

La transformación directa de la energía solar es bastante antigua. Así como mediante una lupa es posible calentar un papel con la radiación solar hasta hacerlo arder, se pueden usar espejos adecuados para focalizar la radiación solar en recipientes con agua y calentarla. También es posible calentar agua mediante sistemas llamados colectores, es decir, grandes depósitos de agua que se calientan por radiación solar.

El agua caliente se puede utilizar para uso doméstico directo, para calefacción o para generación de energía eléctrica. La climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc., son aplicaciones térmicas.

1.2. COLECTORES TÉRMICOS

Los colectores solares térmicos son dispositivos capaces de captar la radiación solar y comunicársela a un fluido, para su posterior aprovechamiento. Los colectores solares se dividen en dos grandes grupos:

- Los Colectores Solares de Concentración: Los cuales haciendo uso de los métodos de concentración ópticos son capaces de elevar la temperatura de fluido a más de 70°C. Estos se aplican en la energía solar térmica de media y alta temperatura.
- Colectores Solares sin concentración: Estos colectores se caracterizan por no poseer métodos de concentración, por lo que la relación entre la superficie del colector y la superficie de absorción es prácticamente la unidad. Los cuales no son capaces de alcanzar altas temperaturas (llegan aproximadamente a unos 70°C) por lo que son usados en las aplicaciones de la energía solar térmica de baja temperatura. Un ejemplo de aplicación sería la producción de agua caliente sanitaria. (Viviana, 2016).

1.2.1. Colector Solar De Placa Plana

En general un colector de placa plana actúa como un receptor que recoge la energía procedente del Sol y calienta una placa, la energía almacenada en la placa es transferida al fluido. Estos colectores, en general, poseen una cubierta transparente de vidrio o plástico que aprovecha el efecto invernadero. Su aplicación es la producción de agua caliente sanitaria, climatización de piscina y calefacción (Rodríguez, Olvera, Dorrbercher, Araiza, & Monteagudo, 2016).

1.2.2. Captadores Solares De Aire

El funcionamiento de los captadores solares de aire es similar al funcionamiento de los captadores solares planos, con las únicas diferencias de que el fluido calor portador utilizado es el aire y en lugar de bombas se utilizan ventiladores para forzar la circulación (Martinez, Franco, & R. Alonso, 2013).

Sus principales ventajas respecto a los captadores planos son:

- No presentan problemas de congelación (en invierno) ni de estancamiento (verano).
- Los componentes del sistema son más simples que los de un sistema hidráulico.
- No hay riesgos de fugas.

Sus principales desventajas son:

- No existen sistemas de acumulación estándar en el mercado.
- El consumo eléctrico de los ventiladores, a causa de las pérdidas de carga, es mayor que el de las bombas de un sistema solar convencional equivalente.
- El rendimiento de estos captadores es menor que el de los captadores planos

1.3. SISTEMAS DE CONTROL

Definimos un sistema de control como el conjunto de elementos que funcionan de manera concatenada para proporcionar una salida o respuesta deseada. Los componentes básicos de un sistema de control pueden ser descritos por:

- Objetivos de control
- Componentes del sistema de control
- Resultados o salida

Los objetivos de control pueden ser identificados como entradas o señales entrantes, los resultados son considerados las salidas o las variables controladas; en general, el objetivo del sistema de control es controlar la salida de manera ordenada actuando los elementos de control sobre la señal de entrada (Corripio & Smith, 1991).

1.4. TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL.

Los tipos de sistemas de control más comunes son los sistemas de control a lazo abierto y los sistemas de control a lazo cerrado.

1.4.1. Sistema de control a lazo abierto

Es aquel sistema de control en el que la salida no es afectada por la señal de entrada. La salida no se realimenta para compararla con la entrada (GUTIÉRREZ & MEJÍA, 2017).

1.4.2. Sistema de control a lazo cerrado (control realimentado)

En el sistema de control a lazo cerrado, el controlador se alimenta de la señal de error de desempeño, la cual representa la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término lazo cerrado siempre indica una acción de control realimentado para reducir el error del sistema (Corripio & Smith, 1991).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. DETERMINACIÓN DE VARIABLES DEL PROCESO

2.2. Modelado del colector solar de placa plana

Para la descripción del proceso de transferencia de calor en el interior del colector solar de placa plana (FPSC), se implementará una identificación analítica de las variables que describen su funcionamiento mediante un modelado matemático.

Para el modelo matemático del colector solar de placa plana se realizó una inspección física detallada del colector solar de placa plana empleado para la implementación del sistema de control debido que existen muchos tipos de colectores de aire con principios de funcionamiento diferentes en los cuales el proceso de transferencia de calor sucede de diferentes formas y con diferentes variables como podemos ver en la Figura 1.



Figura 1. Tipos de colectores solares de aire.

Fuente: Autor, 2019.

Se determinó que el colector solar inicial a implementar es un colector solar placa plana de un solo paso, una cubierta de vidrio, sin seguimiento solar y sin sistema de almacenamiento térmico. Una vez determinado el estado inicial del colector se

procedió a incluir la estrategia de control para obtener el colector modelo con el que finalmente se planteó el análisis térmico teniendo en cuenta las principales variables que inciden en la transferencia de calor del colector y mediante un análisis termodinámico basado en principios de conservación (balance de energía) que involucrara todas las variables a través de una serie de ecuaciones que describieron el proceso de transferencia de calor en el interior del colector. Además, se calcularon los parámetros fijos como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con el fin de reducir el estudio al comportamiento de las variables en el tiempo.

Tabla 1. parámetros fijos y transitorios.

<i>parámetros</i>	<i>Función del tiempo</i>	<i>Fijos</i>
	Temperatura ambiente	Volumen colector
	Temperatura salida colector	Área de Cubierta
	Temperatura entrada colector	Propiedades físicas del aire
	Temperatura placa	Propiedades físicas del agua
	Irradiación solar	

Fuente: Autor,2019

Una vez se obtuvieron las ecuaciones algebraicas se analizaron los estados estacionarios con lo que se determinan las condiciones iniciales del modelo y el estado transitorio donde la variable de interés es la temperatura de salida del colector (T2), con el fin de determinar el comportamiento de modelo en cualquier instante del tiempo, debido a que esta es una variable que se desea controlar. Una vez se determina el modelo correcto se determinó la función de transferencia mediante el cálculo matemático asociado a la ingeniería de control, cambiando las ecuaciones diferenciales

obtenidas para el modelo matemático del colector solar del dominio del tiempo al dominio de Laplace. Este proceso se realizó en dos etapas.

La primera que comprendió los cálculos y ajustes algebraicos para la simplificación de las ecuaciones a convertir en función de transferencia y el proceso de cambio de dominio de las variables según las tablas de transformadas de Laplace con el fin de linealizar la ecuación diferencial y dejarla en términos de la variable de importancia temperatura salida colector (T_2).

La segunda etapa consistió en la construcción de las ecuaciones de transferencia de la salida para cada variable de entrada del sistema, según el principio de superposición la suma de los efectos de las variables de entrada y las condiciones iniciales del (FPSC), es la suma simple de las ecuaciones de transferencia para cada variable de importancia. De acuerdo a esto se obtuvo la función de transferencia global que determina la temperatura de la salida en el (FPSC).

2.3. Determinación de la función de la función de transferencia

Las ecuaciones principales de la (1) a la (44) en este documento utilizadas fueron basadas en el estudio de Hottel y Woertz del comportamiento de los colectores solares. Las otras donde se calcula el controlador fueron guiadas por el método gráfico de Ziegler y Nichols para el ajuste de controladores de diversos tipos.

Se parte de algunos supuestos a la hora del cálculo de las ecuaciones que describen el comportamiento térmico de un colector solar de placa plana para tener mayor simplicidad al momento del análisis, tales como:

- Las pérdidas de calor laterales se toman como despreciables.
- La absorción del vidrio se considera despreciable.
- El aire se tratará como gas ideal.

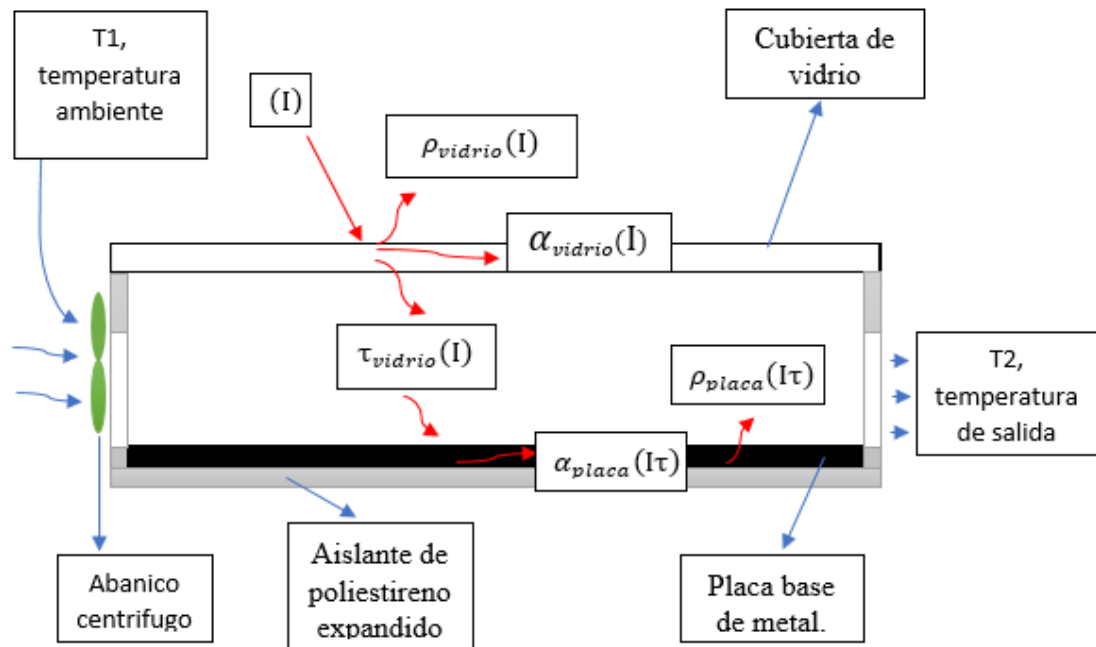


Figura 2. Comportamiento de radiación en colector solar. Fuente: Autor, 2019

Donde:

(I) = es la irradiancia proveniente del sol.

ρ = reflexión

α = absortividad

τ = transmisividad

T_1 = aire a temperatura ambiente.

T_2 = aire caliente a la salida del colector y variable a controlar.

Realizando un análisis del comportamiento para la cubierta de vidrio sabiendo que para cuerpos blancos la absortividad es muy baja y para el caso es supuesta igual a cero.

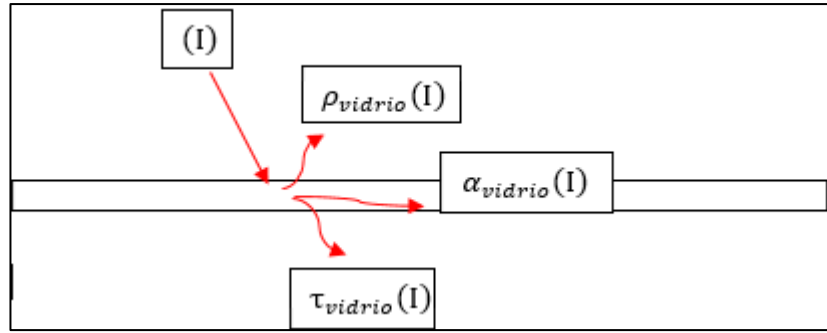


Figura 3. Esquema cubierta de vidrio. Fuente: autor, 2019

De la irradiación proveniente del sol solo pasa al interior del colector:

$$\tau_{vidrio}(I)$$

Ya que lo que se refleja se va al ambiente, descrito por:

$$\rho_{vidrio}(I)$$

Y como anteriormente se había mencionado la absorptividad del vidrio está dada por:

$$\alpha_{vidrio}(I)=0$$

Siguiendo este orden de ideas realizamos un análisis para la placa.

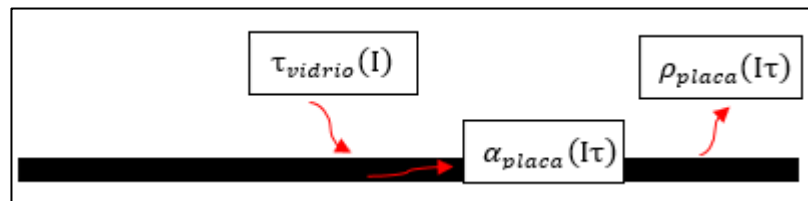


Figura 4. Placa y radiación incidente. Fuente: Autor, 2019

De esta forma el calor total en la placa esta descrito por:

$$\rho_{placa} + \alpha_{placa} = 1 \quad (1)$$

Despejando:

$$\rho_{placa} = 1 - \alpha_{placa} \quad (2)$$

Reemplazando:

$$\rho_{placa}(I\tau) = (1 - \alpha_{placa})(I\tau) \quad (3)$$

La ecuación anterior describe el calor que se refleja de la placa, sube a la cubierta de vidrio y se encuentra con esta por la parte inferior de la misma. como se muestra a continuación.

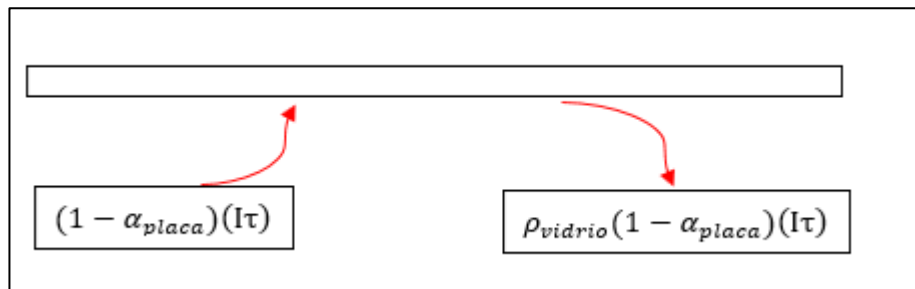


Figura 5. segunda ilustración en el vidrio del calor. Fuente: Autor, 2019

Se muestra nuevamente el proceso en la placa y se demuestra que es repetitivo, así:

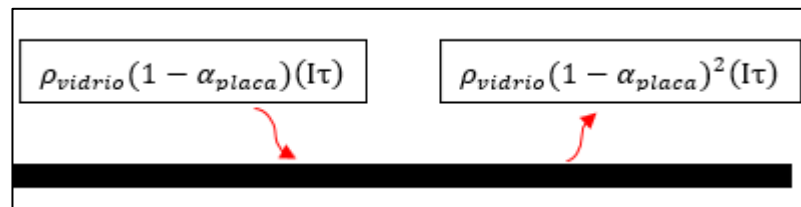


Figura 6. Segunda ilustración en la placa del calor. Fuente: Autor, 2019

Como se repite continuamente de esta forma.

$$\begin{aligned} & [(I\tau) + (1 - \alpha_{placa})(I\tau) + \rho_{vidrio}(1 - \alpha_{placa})(I\tau) + \rho_{vidrio}(1 - \\ & \alpha_{placa})^2(I\tau) \dots] (4) \end{aligned}$$

Realizando factor común:

$$(I\tau)[1 + (1 - \alpha_{placa}) + \rho_{vidrio}(1 - \alpha_{placa}) + \rho_{vidrio}(1 - \alpha_{placa})^2 \dots]$$

Debido a que los términos permanecen constantes se realiza una serie o suma geométrica.

$$a = (I\tau)$$

$$r = \rho_{vidrio}(1 - \alpha_{placa})$$

Donde a es el primer término de la serie, r la razón común además $r \neq 1$, teniendo en cuenta que la serie es de la forma como se muestra a continuación.

$$\sum_{n=0}^a (ar^n) = \frac{a}{1-r} \quad (5)$$

Reemplazando:

$$\sum_{n=0}^a (ar^n) = \frac{(I\tau)}{1 - \rho_{vidrio}(1 - \alpha)} \quad (6)$$

De esta forma calculamos el calor absorbido (Q_{abs}):

$$Q_{abs} = \frac{IA_C(I\tau)}{1 - \rho_{vidrio}(1 - \alpha)} \quad (7)$$

Ahora realizando un balance de energía en el colector para encontrar Q_{util} tenemos que:

$$Q_{util} = Q_{abs} - Q_{perdidas} \quad (8)$$

Donde:

$$Q_{util} = \dot{m}_{aire} C_p (T_2 - T_1) \quad (9)$$

\dot{m}_{aire} = flujo másico de aire

C_p =calor específico del aire

Para el cálculo del calor que se pierde ($Q_{perdida}$) se tiene:

$$Q_{perdida} = U_L A_C (T_{placa} - T_{amb}) \quad (10)$$

U_L = coeficiente global de perdidas.

A_C = área de la cubierta del colector

El coeficiente global de pérdidas (U_L) se calcula de la siguiente forma:

$$U_L = U_{cubierta} + U_{base} + U_{laterales} \quad (11)$$

haciendo uso de los supuestos planteados $U_{laterales} = 0$ así:

$$U_L = U_{cubierta} + U_{base}$$

Para las perdidas en la base U_{base} se tiene.

$$U_{base} = \frac{K_{aislante}}{e_{aislante}} \quad (12)$$

$K_{aislante}$ =conductividad térmica del aislante.

$e_{aislante}$ =espesor del aislante.

Para $U_{cubierta}$ se utiliza la formulación de Hottel y Woertz

$$U_{cubierta} = \frac{1}{\frac{N(N+f)^{0,31}}{344(T_{placa}-T_{amb})^{0,31}} + \frac{1}{h_{cub}}} + \frac{\sigma(T_{placa}+T_{amb})((T_{placa})^2+(T_{amb})^2)}{\frac{1}{\epsilon_p+0,0425N(1-\epsilon_p)} + \frac{2N+f-1}{\epsilon_c} - N} \quad (13)$$

De donde:

N =numero de cubiertas

f = Coeficiente de forma que relaciona el coeficiente convectivo de transferencia de calor sobre la cubierta con el número de estas N , (formula obtenida de manera experimental)

σ =constante de Stefan-Boltzmann

ε_c =emisividad de la cubierta

ε_p =emisividad de la placa

h_{cub} = La ecuación se basó en el estudio y análisis de cubiertas de vidrio opacas a ondas largas. De esta forma tenemos que:

$$h_c = 5,7 + 3,8V \quad (14)$$

V = Velocidad del viento en m/s

Para el coeficiente de forma f esta dado por:

$$f = [(1 - 0,04h_c) + (5,10^{-4})(h_c)^2](1 + 0,091N) \quad (15)$$

Donde c :

$$c = 365,9(1 - 0,00883b + 0,00013b^2) \quad (16)$$

b = es la inclinación del colector con respecto a la horizontal.

De esta forma la emisividad de la cubierta ε_c es:

$$\varepsilon_c = 0,88$$

Y la emisividad de la placa ε_p es:

$$\varepsilon_p = 0,95$$

Así el calor perdido $Q_{perdidas}$ es:

$$Q_{perdidas} = U_L A_c (T_{media} - T_{amb}) \quad (17)$$

Reemplazando:

$$Q_{perdidas} = \frac{\frac{A_c (T_{media} - T_{amb})}{N(N+f)^{0,31}} \frac{1}{\frac{344(T_{media} - T_{amb})^{0,31}}{T_{placa}} + h_{cub}}}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0,0425N(1-\varepsilon_p)} + \frac{2N+f-1}{\varepsilon_c} - N} + \frac{A_c ((T_{media})^4 + (T_{amb})^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0,0425N(1-\varepsilon_p)} + \frac{2N+f-1}{\varepsilon_c} - N} \quad (18)$$

Para la ecuación completa:

$$Q_{util} = Q_{abs} - Q_{perdidas}$$

Reemplazando:

$$Q_{util} = \frac{I(\tau)}{1-(1-\alpha)(\rho_{vidrio})} A_c - \dot{m}_{aire} C_{p-aire} (T_2 - T_1) - u_l (T_m - T_{amb}) A_c \quad (19)$$

$$\dot{m}_{aire} = \rho_{aire} \dot{V}_{aire} C_{p-aire} \quad (20)$$

Donde

ρ_{aire} =es la densidad del aire

\dot{V}_{aire} =flujo volumétrico de aire

C_{p-aire} =calor específico del aire

Realizando una sustitución con el fin de simplificar la expresión:

$$\beta = \frac{I(\tau)}{1-(1-\alpha)(\rho_{vidrio})} \quad (21)$$

Así la forma de ecuación que rige el proceso de transferencia de calor en el interior del colector está dada por:

$$\beta A_c I - \rho_{aire} \dot{V}_{aire} C_{p-aire} (T_2 - T_1) - u_l A_c (T_m - T_{amb}) = \rho_{aire} C_{p-aire} V \left(\frac{dT_2}{dt} \right) \quad (22)$$

Llevando los parámetros variables al dominio del tiempo la ecuación queda de la siguiente forma

$$\beta A_c I_{(t)} - \rho_{aire} \dot{V}_{aire} C_{p-aire} (T_{2(t)} - T_{1(t)}) - u_l A_c (T_{m(t)} - T_{amb(t)}) = \rho_{aire} C_{p-aire} V \left(\frac{dT_{2(t)}}{dt} \right) \quad (23)$$

Se procede aplicar operaciones algebraicas con el fin de que unificar los parámetros variables en el tiempo

dividiendo entre:

$$\rho_{aire} C_{p-aire} V$$

Así

$$\frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} I_{(t)} - \frac{\rho_{aire} \dot{V}_{aire} C_{p-aire}}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} (T_{2(t)} - T_{1(t)}) - \frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} (T_{m(t)} - T_{amb(t)}) = \frac{dT_{2(t)}}{dt} \quad (24)$$

Cancelando términos semejantes y reescribiendo:

$$\frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} I_{(t)} - \frac{\dot{V}_{aire}}{V} (T_{2(t)} - T_{1(t)}) - \frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} (T_{m(t)} - T_{amb(t)}) = \frac{dT_{2(t)}}{dt} \quad (25)$$

Calculamos temperatura media T_m :

$$T_m = \frac{T_{2(t)} + T_{1(t)}}{2} \quad (26)$$

Reemplazando la temperatura media T_m en la ecuación anterior tenemos:

$$\frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} I_{(t)} - \frac{\dot{V}_{aire}}{V} (T_{2(t)} - T_{1(t)}) - \frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \left(\frac{T_{2(t)}}{2} + \frac{T_{1(t)}}{2} - T_{amb(t)} \right) = \frac{dT_{2(t)}}{dt} \quad (27)$$

Realizando el producto, tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} I_{(t)} - \frac{\dot{V}_{aire} T_{2(t)}}{V} + \frac{\dot{V}_{aire} T_{1(t)}}{V} - \frac{u_l A_c T_{2(t)}}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} - \frac{u_l A_c T_{1(t)}}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \\ + \frac{u_l A_c T_{amb(t)}}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} = \frac{dT_{2(t)}}{dt} \end{aligned}$$

Ordenando y agrupando términos semejantes:

$$\begin{aligned} \frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} I_{(t)} - \left[\frac{\dot{V}_{aire}}{V} + \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right] T_{2(t)} + \left[\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right] T_{1(t)} + \\ \frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} T_{amb(t)} = \frac{dT_{2(t)}}{dt} \end{aligned} \quad (28)$$

La anterior ecuación diferencial que describe el modelo de transferencia de calor es de segundo orden en la variable $T_{2(s)}$. Para determinar una función que muestre la interacción de las variables principales con la de interés, se requiere llevar la ecuación a un dominio tal que se pueda despejar T_2 en términos de las demás variables, es decir determinación de la función de transferencia, el modelo.

Para lo que se traslada la ecuación al dominio de Laplace.

$$\mathcal{L} \left[\frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} I(t) - \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} + \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{2(t)} + \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{1(t)} + \frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} T_{amb(t)} \right] = \mathcal{L} \left[\frac{dT_{2(t)}}{dt} \right] \quad (29)$$

Aplicando propiedades de la transformada de Laplace, tenemos:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) \mathcal{L}[I(t)] - \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} + \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) \mathcal{L}[T_{2(t)}] \\ & + \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) \mathcal{L}[T_{1(t)}] + \left(\frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) \mathcal{L}[T_{amb(t)}] \\ & = \mathcal{L} \left[\frac{dT_{2(t)}}{dt} \right] \end{aligned}$$

Ejecutando la propiedad:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) I(s) - \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} + \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{2(s)} + \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{1(s)} + \\ & \left(\frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{amb(s)} = sT_{2(s)} - T_{2(0)} \end{aligned} \quad (30)$$

Organizando:

$$\begin{aligned} & sT_{2(s)} - T_{2(0)} + \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} + \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{2(s)} \\ & = \left(\frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) I(s) + \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{1(s)} \\ & + \left(\frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{amb(s)} \end{aligned}$$

Factorizando $T_{2(s)}$ tenemos:

$$T_{2(s)} \left(s + \left(\frac{\dot{v}_{aire}}{V} + \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) \right) = T_{2(0)} + \left(\frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) I_{(s)} + \left(\frac{\dot{v}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{1(s)} + \left(\frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{amb(s)} \quad (31)$$

Ahora se obtendrá la tasa de cambio energética interna del colector y la llamamos τ

$$\tau = \frac{1}{\frac{\dot{v}_{aire}}{V} + \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire} C_{p-aire} V}} \quad (32)$$

Reemplazando τ en la ecuación n tenemos:

$$T_{2(s)} \left(\frac{\tau s + 1}{\tau} \right) = T_{2(0)} + \left(\frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) I_{(s)} + \left(\frac{\dot{v}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{1(s)} + \left(\frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{amb(s)} \quad (33)$$

Despejando $T_{2(s)}$ obtenemos la función de transferencia del modelo planteado considerando solo el comportamiento normal de la transferencia de calor en el interior del colector solar, como una expresión de los parámetros variables en el tiempo ideal para analizar el grado de acierto del modelo planteado mediante una comparación con una prueba real:

$$T_{2(s)} = \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) T_{2(0)} + \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \left(\frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) I_{(s)} + \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \left(\frac{\dot{v}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{1(s)} + \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \left(\frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) T_{amb(s)} \quad (34)$$

Una vez determinada la función de transferencia del colector solar sin estrategia de control, se procede a calcular dicha ecuación para el sistema con la estrategia de control ya implementada para lo que se regresa a la ecuación inicial en el dominio del tiempo e introducimos la ecuación del intercambiador que se implementará al colector solar de placa plana.

$$\beta A_c I_{(t)} - \rho_{aire} \dot{V}_{aire} C_{p-aire} (T_{2(t)} - T_{1(t)}) - u_l A_c \left(\frac{T_{2(t)}}{2} + \frac{T_{1(t)}}{2} - T_{amb(t)} \right) - \rho_{agua} C_{p-agua} \dot{V}_{(t)} [T_{i(t)} - T_{f(t)}] = \rho_{aire} C_{p-aire} V \left(\frac{dT_{2(t)}}{dt} \right) \quad (35)$$

donde:

ρ_{agua} =densidad del agua.

C_{p-agua} =calor especifico del agua.

$\dot{V}_{(t)}$ =flujo volumétrico de agua en el tiempo.

$T_{i(t)}$ = temperatura de entrada del agua en el tiempo.

$T_{f(t)}$ =temperatura de salida del agua en el tiempo.

Para la estrategia de control la variable de incidencia es el flujo de agua por lo que $\dot{V}_{(t)}$ se encuentra fluctuante en el tiempo debido a que las variaciones de esta variable estarán predeterminadas con el fin de generar una acción positiva o negativa sobre la temperatura de salida. Los procedimientos algebraicos son similares a los realizados anteriormente.

De esta forma dividiendo entre $\rho_{aire}C_{p-aire}V$ tenemos:

$$\begin{aligned} & \frac{\beta A_c}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} I_{(t)} - \frac{\rho_{aire}\dot{V}_{aire}C_{p-aire}}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} T_{2(t)} + \frac{\rho_{aire}\dot{V}_{aire}C_{p-aire}}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} T_{1(t)} - \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire}C_{p-aire}V} T_{2(t)} - \\ & \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire}C_{p-aire}V} T_{1(t)} + \frac{u_l A_c}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} T_{amb(t)} - \frac{\rho_{agua}C_{p-agua}\Delta T_{agua}}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} \dot{V}_{(t)} = \frac{dT_{2(t)}}{dt} \end{aligned} \quad (36)$$

Cancelando términos iguales queda:

$$\begin{aligned} & \frac{\beta A_c}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} I_{(t)} - \frac{\dot{V}_{aire}}{V} T_{2(t)} + \frac{\dot{V}_{aire}}{V} T_{1(t)} - \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire}C_{p-aire}V} T_{2(t)} - \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire}C_{p-aire}V} T_{1(t)} + \\ & \frac{u_l A_c}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} T_{amb(t)} - \frac{\rho_{agua}C_{p-agua}\Delta T_{agua}}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} \dot{V}_{(t)} = \frac{dT_{2(t)}}{dt} \end{aligned} \quad (37)$$

Organizando:

$$\begin{aligned} & \frac{\beta A_c}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} I_{(t)} - T_{2(t)} \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} + \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire}C_{p-aire}V} \right) \\ & + T_{1(t)} \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire}C_{p-aire}V} \right) + \frac{u_l A_c}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} T_{amb(t)} \\ & - \frac{\rho_{agua}C_{p-agua}\Delta T_{agua}}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} \dot{V}_{(t)} = \frac{dT_{2(t)}}{dt} \end{aligned}$$

Aplicando la transformada de Laplace tenemos:

$$\begin{aligned} & \frac{\beta A_c}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} I_{(s)} - T_{2(s)} \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} + \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire}C_{p-aire}V} \right) + T_{1(s)} \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire}C_{p-aire}V} \right) + \\ & \frac{u_l A_c}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} T_{amb(s)} - \frac{\rho_{agua}C_{p-agua}\Delta T_{agua}}{\rho_{aire}C_{p-aire}V} \dot{V}_{(s)} = sT_{2(s)} - T_{2(0)} \end{aligned} \quad (37)$$

Factorizando $T_{2(s)}$ así:

$$\begin{aligned}
T_{2(s)} & \left(s + \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} + \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) \right) \\
& = T_{2(0)} + \frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} I_{(s)} + T_{1(s)} \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) \\
& \quad + \frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} T_{amb(s)} - \frac{\rho_{agua} C_{p-agua} \Delta T_{agua}}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \dot{V}_{(s)}
\end{aligned}$$

Reemplazando τ antes calculado en la ecuación anterior. Así tenemos:

$$\begin{aligned}
T_{2(s)} \left(\frac{\tau s + 1}{\tau} \right) & = T_{2(0)} + \frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} I_{(s)} + T_{1(s)} \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) + \\
& \quad \frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} T_{amb(s)} - \frac{\rho_{agua} C_{p-agua} \Delta T_{agua}}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \dot{V}_{(s)}
\end{aligned} \tag{38}$$

Despejando $T_{2(s)}$ obtenemos la función de transferencia del modelo planteado con la estrategia de control para el manejo de la transferencia de calor en el interior del colector solar

$$\begin{aligned}
T_{2(s)} & = \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) T_{2(0)} + \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} I_{(s)} + T_{1(s)} \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \right. \\
& \quad \left. \frac{u_l A_c}{2\rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) + \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} T_{amb(s)} - \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \frac{\rho_{agua} C_{p-agua} \Delta T_{agua}}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \dot{V}_{(s)}
\end{aligned} \tag{39}$$

Con las ecuaciones antes calculadas se estimó la función de transferencia de calor.

Como la variable a controlar es $T_{2(s)}$ es necesario determinar el grado de incidencia de cada una de las variables en la variable a controlar para lo que se debe calcular los parámetros de incidencia F uno para cada variable en dominio de Laplace, así:

$$F_1 = \frac{I_{(s)}}{T_{2(s)}} = \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \quad (40)$$

$$F_2 = \frac{T_{1(s)}}{T_{2(s)}} = \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) \quad (41)$$

$$F_3 = \frac{T_{amb(s)}}{T_{2(s)}} = \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \quad (42)$$

$$F_4 = \frac{\dot{V}_{(s)}}{T_{2(s)}} = \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \frac{\rho_{agua} C_{p-agua} \Delta T_{agua}}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \quad (43)$$

Una vez determinados los parámetros de incidencia se aplica el principio de superposición con lo que se expresa T_2 , así:

$$T_{2(s)} = F_{1(s)} I_{(s)} + F_{2(s)} T_{1(s)} + F_{3(s)} T_{amb(s)} + F_{4(s)} \dot{V}_{(s)} \quad (44)$$

2.4. SISTEMA DE CONTROL

Una vez determinada la función de transferencia global del (FPSC) se procedió a diseñar el sistema de control tales que la temperatura de salida T2 siga una entrada de referencia predeterminada (SetPoint) en función del tiempo con la mayor precisión posible.

Este proceso de diseño se realizó en tres etapas principales que fueron la realización del diagrama de bloque correspondiente al lazo cerrado de control que describe la estrategia de control del modelo planteado, el diseño del controlador y la construcción física del sistema de control.

Para la realización del diagrama del lazo de control se determinó como variable de control el flujo de agua por el interior del serpentín, como las variables inciden sobre la temperatura de salida de manera superpuesta tenemos que el controlador solo influye sobre la variable de control.

2.4.1. Diseño Del Sistema De Control

Las ecuaciones de superposición obtenidas corresponden a la representación lineal de la temperatura de salida del sistema con relación a los parámetros variables por lo que se plantea un diagrama de bloque equivalente a dicha expresión, siendo cada F un bloque función cuya única relación es $T_{2(s)}$, como se muestra en la **Figura 7**.

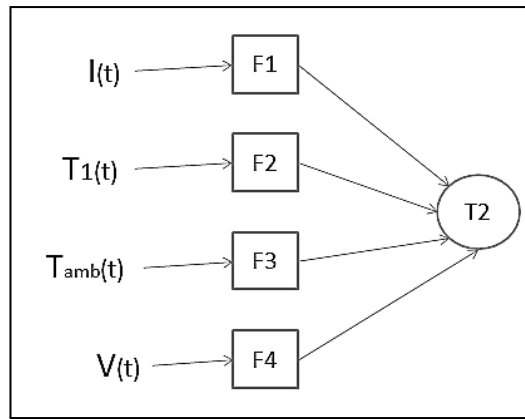


Figura 7. Representación lineal con relación a parámetros variables. Fuente: Autor, 2019

El sistema corresponde a un lazo de control cerrado debido a que el sistema se pretende mantener en constante monitoreo y respuesta rápida ya que se busca las fluctuaciones sean mínima con respecto a la temperatura de referencia (SetPoint), dicha respuesta está dada por la estrategia de control por lo que tiene incidencia directa en la variable a controlar, como se ilustra en la Figura 8.

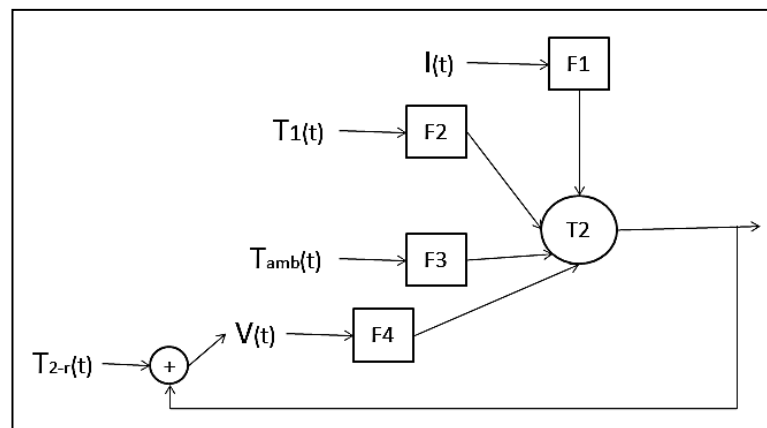


Figura 8. Esquema lazo cerrado. Fuente: Autor, 2019

Con lo anterior se seleccionó Controlador proporcional-integral teniendo en cuenta las características del modelo y del comportamiento de la variable de interés, ya que esta es más propensa a decaer por lo que el sistema debe prever dicha caída anticipando con un alza tendiendo a estabilizar la temperatura desde la parte superior de dicho valor

Como la variable a controlar es $\dot{V}_{(s)}$ el controlador se aplica sobre este:

$$F_{4(s)}G(s) = \frac{K_c}{\tau_{is}} (\tau_{is} + 1) \left(\frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \frac{\rho_{agua} C_{p-agua} \Delta T_{agua}}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \quad (45)$$

Para la determinación de los parámetros del controlador se empleó el método grafico de ZIEGLER Y NICHOLS según el cual se permite ajustar o "sintonizar" un controlador PI de forma empírica, sin necesidad de conocer las ecuaciones de la planta o del sistema controlado y permite definir las ganancias proporcional, integral y derivativa a partir de la respuesta del sistema en lazo cerrado

Para él se requiere extraer de la gráfica de la función de transferencia del colector solar los parámetros T1 y T2 como se observa:

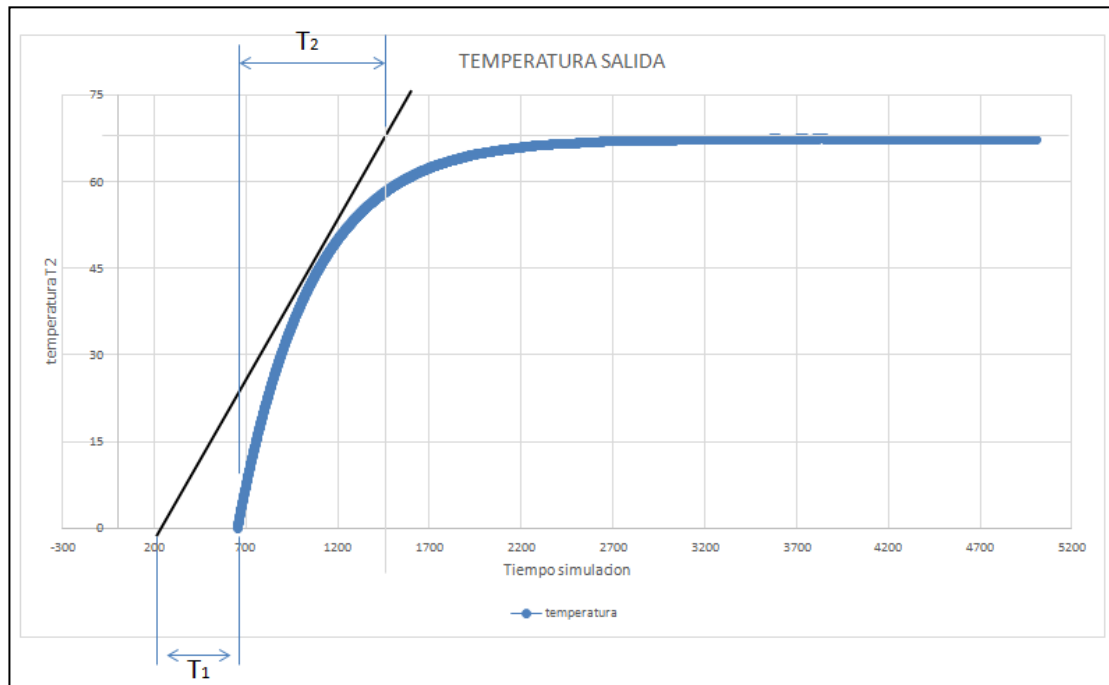


Figura 9. método grafico de ZIEGLER Y NICHOLS. Tomada de: reglas de sintonización de controladores de ziegler y nichols, 2017

Donde:

T1: tiempo muerto del sistema, lo que tarda en generar efecto las variables al iniciar el proceso

T2: tiempo en el que las variables ejercen influencia creciente en la temperatura de salida, se acerca a la temperatura de referencia.

Con estos parámetros se determina la constante del sistema K_o como la pendiente de la línea de crecimiento del sistema.

$$K_o = \frac{1450-200}{65-0} \times \frac{s}{^{\circ}C} \quad (46)$$

Con lo que K_o está dado por:

$$K_o = 19,23 \frac{s}{^{\circ}C}$$

Para el diseño del controlador se procede a calcular los parámetros del mismo según las ecuaciones planteadas en el método utilizado, como se aprecia en la Tabla 2.

Tabla 2. Constantes acordes al tipo de controlador.

Control	K_p	K_i	K_d
P	K_o		
PI	$0.9 * K_o$	$0.27K_o/T1$	
PD	$1.6 * K_o$		$0.60K_o/T1$
PID	$1.2K_o$	$0.60K_o/T1$	$0.60K_o/T1$

Tomado de: uso y determinación de los parámetros de un controlador PID mediante el método de ensayo y error de ZIEGLER Y NICHOLS, 2017

La tabla muestra los tipos de controladores y sus respectivas equivalencias numéricas para cada factor del controlador de la cual se determinarán los parámetros K_p y K_i correspondientes al tipo de controlador seleccionado.

$$K_p = 0,9x(19,23) \quad y \quad K_i = 0,27x\left(\frac{19,23}{500}\right)$$

$$Kp = 17,307 \quad y \quad Ki = 0,0103842$$

Se define el controlador para el diagrama de bloques del sistema de control como Wc entonces:

$$Wc = Kp + Ki \quad (47)$$

Con lo que el sistema de control planteado para mantener la temperatura de salida en el sistema queda de la siguiente manera:

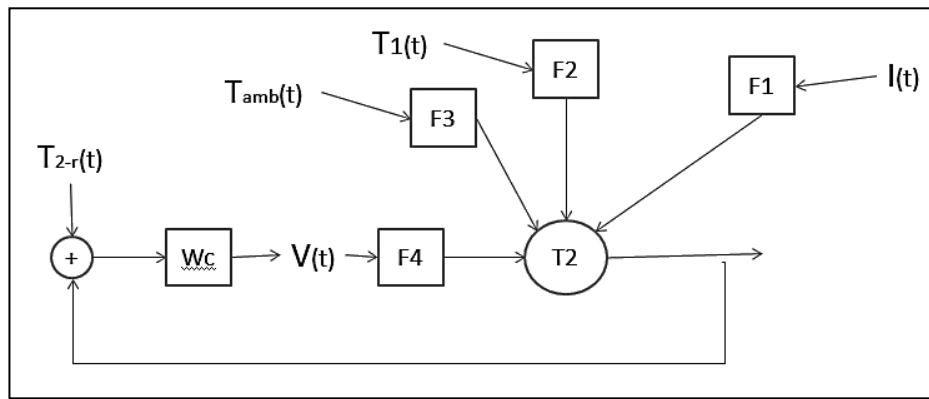


Figura 10. Controlador completo. Fuente: autor, 2019

La Figura 10 muestra la forma del diagrama de bloques para un sistema cerrado donde la variable de interés es la temperatura de salida $T2$ y variable de control es $\dot{V}(t)$ con respecto al punto de referencia.

Para la construcción del sistema de control diseñado fue necesario seleccionar los elementos que comprendían la interfaz física de sistema de control en función de la capacidad de respuesta y el tipo de variable implicadas, el modelo además se fabricó una interfaz de usuario flexible y eficiente que permitiera una fácil manipulación.

Existe una gran variedad de tarjetas para el proceso de adquisición de datos, entre ellos encontramos Arduino Uno, Arduino Mega 2560 R3, Arduino MKR1000 entre otros.

Se selecciono un **Arduino mega 2560 R3** como se muestra en la Figura 11 . Este tipo

de Arduino tiene 54 pines de entradas/salidas digitales (14 de las cuales pueden ser utilizadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serial por hardware), cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, Jack de alimentación, conector ICSP y botón de reset. Arduino Mega 2560 R3 incorpora todo lo necesario para que la adquisición de datos y ejecución de ordenes; simplemente conectándolo al PC por medio de un cable USB o con una fuente de alimentación externa (9 hasta 12VDC).

El Arduino MEGA 2560 R3 se condiciono a trabajar con el software utilizado en la etapa de modelado SIMULINK de Matlab se tuvo en cuenta que la variación de temperatura involucra un proceso lento, por lo tanto, es justificable el empleo de esta tarjeta para el registro de datos y una reducción notoria en relación al precio que tendría el uso de una tarjeta de adquisición de datos comercial.

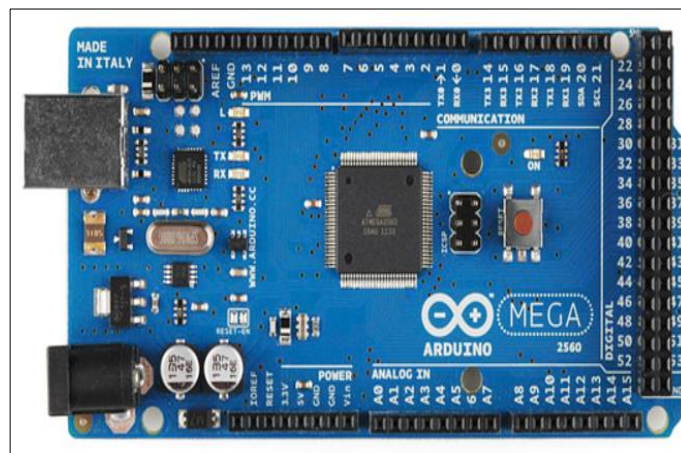


Figura 11. Arduino mega 2560 R3 fuente:

(<http://arduino.cl>, 2017)

Para el censado de los datos se seleccionó unos sensores DHT11 como se muestra en la Figura 12. Encargados de medir la temperatura en las diversas ubicaciones necesarias como lo son la temperatura de entrada del agua, la temperatura de salida de la misma, la temperatura de placa del colector, la temperatura ambiente y por último

la temperatura de salida que en la encargada de generar las correcciones de los parámetros dependiendo la necesidad. Para la selección de estos sensores se tuvo en cuenta factores como; la compatibilidad con la tarjeta microcontroladora, la accesibilidad, la economía y la fácil manipulación e instalación de los mismos

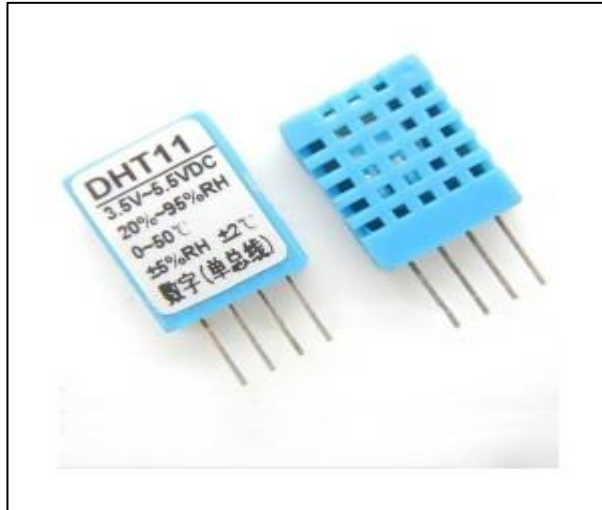


Figura 12. Sensor dht11

Fuente: (<https://electronilab.co/tienda/sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11/>)

A continuación, un esquema de la conexión entre dichos sensores y la placa de adquisición de datos como se observa en la Figura 13, donde se puede ver con claridad la facilidad de la instalación.

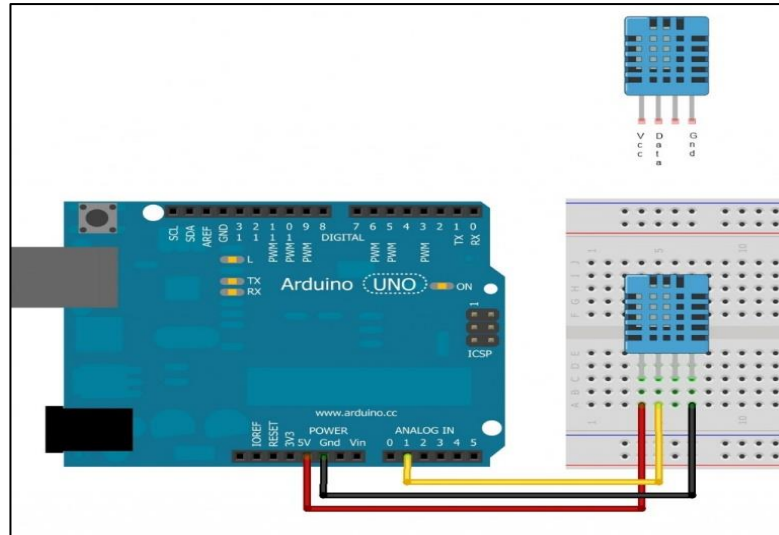


Figura 13 Conexión sensor dht11 a Arduino mega

Fuente:(<http://mikroe.es/sensor-de-humedad-y-temperatura-dht11>)

Para la selección de la electroválvula que nos permitió el paso del agua fría o en su defecto del agua caliente para hacer al sistema sostenible en términos de la salida del aire caliente. Tuvimos en cuenta criterios como caudal, la temperatura máxima del agua que iba a dejar circular, la presión máxima, además, se verifico la compatibilidad con el Arduino y a su vez se tuvo en cuenta la accesibilidad y el precio de la misma. La electroválvula seleccionada es la que se muestra en la Figura 14.

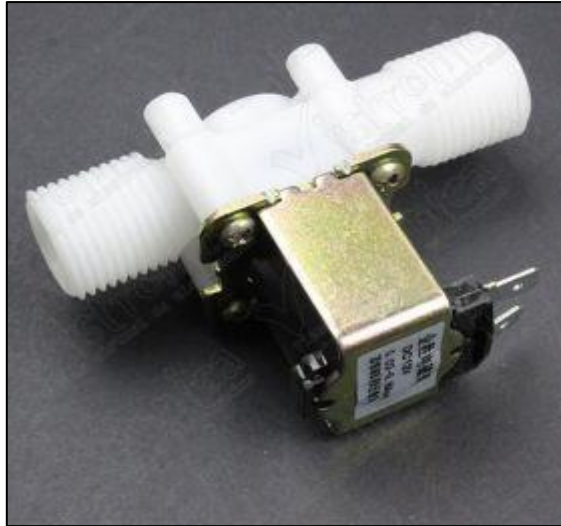


Figura 14 Electroválvula de plástico 12v 1/2" sin presión

Fuente: (https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-452218165-electrovalvula-de-plastico-12v-12-sin-presion-_JM)

Para la selección de la electrobomba se hizo una observación de la criticidad del proceso y se llegó a la conclusión que era un sistema que manejara baja presión teniendo en cuenta esto se eligió una electrobomba comercial y de fácil acceso económico. Esta es la que se muestra en la Figura 15

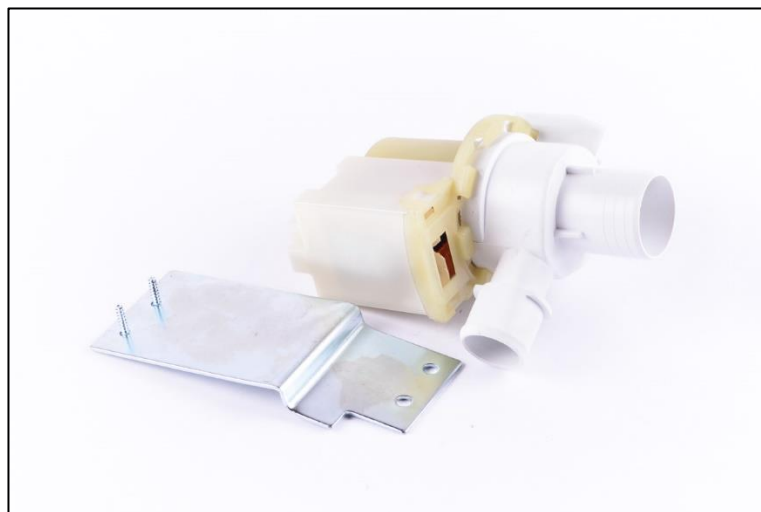


Figura 15 Electro bomba

fuelle: <http://www.lyrdelvalle.com/repuestos-lavadoras/0861-bomba-mabe-olimpia-platina-gen%C3%A9rica-detalle.html>

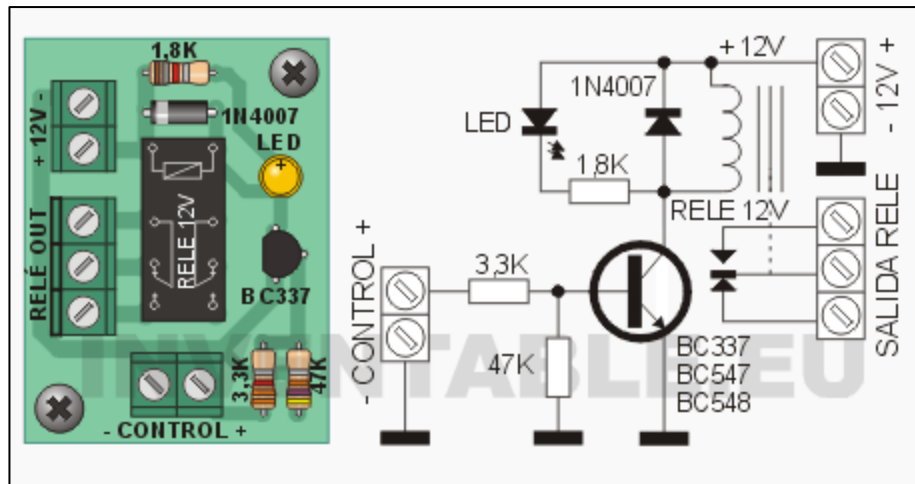


Figura 16 Circuito de control electro bomba y electro válvula

fuelle: (: <https://www.inventable.eu/controlar-rele-con-transistor/>)

COMPONENTES:

- Relé 12V
- Resistencias de 1.8k, 3.3k y 47k
- Transistor BC337
- Diodo 1n4007
- Luces led

Además de los componentes anteriores se usó una lámina calibre 20 como se muestra en la Figura 17 para la construcción del reservorio de agua y un perfil en L (1x1/8”),
¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. para la elaboración del soporte para el reservorio.

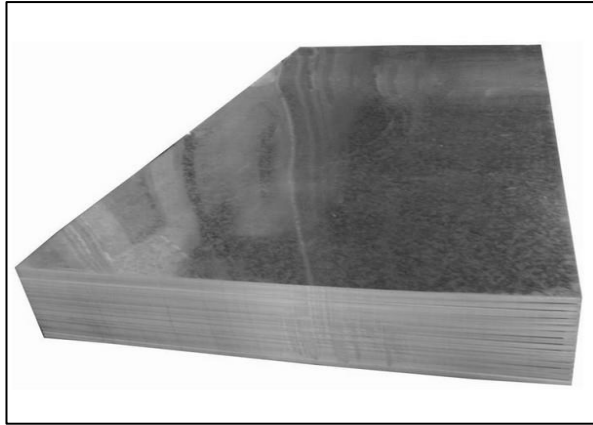


Figura 17 Lámina galvanizada calibre 20

Fuente: (<https://cofiasa.com.mx/productos/hojalateria/lamina-galvanizada-lisa/>)

3. IMPLEMENTACION Y VALIDACION.

La implementación se realizó en tres etapas, la primera fue la restauración total del colector solar de placa plana como se observa en la Figura 18 , haciendo énfasis en la capacidad óptica de la cubierta y el aislamiento térmico del colector.



Figura 18 restauración de colector solar de placa plana

fuelle: Autor, 2019

En la segunda etapa se realizaron las modificaciones encaminadas a garantizar la implementación del sistema de control, teniendo en cuenta no afectar las condiciones de forma iniciales del colector. La modificación consistió en instalar un serpentín en el interior del colector con salida por uno de los costados como se observa en la Figura 19.



Figura 19 ilustración serpentín para colector solar de placa plana

Fuente: Autor, 2019

Posteriormente a la instalación del serpentín se acoplo el reservorio de agua como se aprecia en la Figura 20, el cual es utilizado para el aporte o retiro de calor dependiendo la necesidad.



Figura 20 sistema con serpentín y reservorio de agua.

Fuente: Autor, 2019

Por último, la construcción física del sistema de control teniendo en cuenta los elementos varios seleccionados como: sensores, cableado, conectores, tuberías, válvulas, controladores, actuadores y la interfaz del usuario como se puede apreciar en

la Figura 21. La selección de los componentes del sistema de control fue debido a su accesibilidad y economía.



Figura 21 sistema completo con todas las partes físicas y electrónicas.

Fuente: autor, 2019

3.1. VALIDACION DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL.

Posterior a la implementación del sistema físico en conjunto con la estrategia de control, se realizó una inspección visual para la verificación de los diversos elementos.

El rango de temperatura que debe garantizar el sistema físico empalmado con la estrategia de control es de $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Para la interpretación de los datos se realizó un análisis estadístico de los datos obtenidos sin la estrategia de control y después de aplicar esta, además se veló que se mantuviera dentro del rango establecido. De esta forma se llevó a cabo la validación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El objetivo principal de este capítulo es presentar el resultado de las pruebas experimentales que se realizaron; la toma de datos, registro, manejo de mediciones e interpretación de los mismos etc.

Luego de realizados los procedimientos descritos en la metodología, entre los que se encuentran; adecuación del colector, diseño del modelo analítico, prueba de temperaturas en la transferencia de calor del colector, diseño y montaje del sistema de control y la validación del sistema mediante un análisis estadístico de los datos de temperatura de salida del colector solar para los escenarios con o sin estrategia de control de temperatura.

4.1. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

4.1.1. Modelado del colector solar

El modelo se desarrolló en función de las variables del sistema partiendo de las características del colector solar a implementar con el sistema de control y las condiciones del proceso basado en literatura. Se tomó el interior del colector como un volumen de control para el análisis de la transferencia de calor se realizó un balance de energía.

$$Q_{util} = Q_{abs} - Q_{perdidas} \quad (8)$$

El calor útil corresponde a el que es aprovechado por un flujo de aire que ingresa al sistema con una temperatura T_1 y sale del volumen de control con una temperatura T_2 , por otra parte, todo el calor absorbido por el sistema proviene de la radiación solar incidente sobre el área de la cubierta del colector. De igual manera las perdidas más

significativas ocurren por la parte superior del colector principalmente asociadas a la convección natural de la superficie y la radiación dada por los cuerpos calientes (placa y cubierta). Para el análisis del calor absorbido en el interior de colector fue fundamental tener en cuenta el efecto invernadero generado por las características ópticas, térmicas de la cubierta y de la placa absorbidora. Además de la tasa radiación solar $I(t)$ la cual varia a lo largo del día.

El calor absorbido este dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{abs} = \frac{IA_c(I\tau)}{1-\rho_{vidrio}(1-\alpha)} \quad (7)$$

Las pérdidas por la cubierta del colector están dadas por las diferencias de temperatura entre este y el ambiente, la característica irradiante de la placa absorbidora, aunque parece simple este implica un análisis complejo debido a que involucra muchas variables, parámetros de forma y características de los materiales. Las pérdidas mencionadas están dadas por la siguiente ecuación.

$$Q_{perdidas} = U_L A_c (T_{media} - T_{amb}) \quad (10)$$

La ecuación que involucra las variables de estado para el colector solar es la siguiente:

Estado estable:

$$\frac{I(I\tau)}{1-(1-\alpha)(\rho_{vidrio})} A_c - \dot{m}_{aire} C_{p-aire} (T_2 - T_1) - u_l (T_m - T_{amb}) A_c = 0 \quad (19)$$

Para el estado transitorio:

$$\begin{aligned} \frac{I(I\tau)}{1-(1-\alpha)(\rho_{vidrio})} A_c - \dot{m}_{aire} C_{p-aire} (T_2 - T_1) - u_l (T_m - T_{amb}) A_c = \\ \rho_{aire} C_{p-aire} V \left(\frac{dT_2}{dt} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

A partir del modelo analítico de transferencia de calor a nivel interno del colector solar de placa plana, se obtuvo la función de transferencia. Como se muestra en la ecuación.

$$T_{2(s)} = \left(\frac{\tau}{\tau s + 1}\right) T_{2(0)} + \left(\frac{\tau}{\tau s + 1}\right) \frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} I_{(s)} + T_{1(s)} \left(\frac{\tau}{\tau s + 1}\right) \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) + \left(\frac{\tau}{\tau s + 1}\right) \frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} T_{amb(s)} - \left(\frac{\tau}{\tau s + 1}\right) \frac{\rho_{agua} C_{p-agua} \Delta T_{agua}}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \dot{V}_{(s)} \quad (39)$$

Esta se fracciona en bloques individuales que permitan la posterior programación en Simulink de Matlab, así:

$$F_1 = \frac{I_{(s)}}{T_{2(s)}} = \left(\frac{\tau}{\tau s + 1}\right) \frac{\beta A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \quad (40)$$

$$F_2 = \frac{T_{1(s)}}{T_{2(s)}} = \left(\frac{\tau}{\tau s + 1}\right) \left(\frac{\dot{V}_{aire}}{V} - \frac{u_l A_c}{2 \rho_{aire} C_{p-aire} V} \right) \quad (41)$$

$$F_3 = \frac{T_{amb(s)}}{T_{2(s)}} = \left(\frac{\tau}{\tau s + 1}\right) \frac{u_l A_c}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \quad (42)$$

$$F_4 = \frac{\dot{V}_{(s)}}{T_{2(s)}} = \left(\frac{\tau}{\tau s + 1}\right) \frac{\rho_{agua} C_{p-agua} \Delta T_{agua}}{\rho_{aire} C_{p-aire} V} \quad (43)$$

A continuación en la Tabla 3 se muestran los parámetros fijos tenidos en cuenta.

Tabla 3 parámetros fijos reales que intervienen en el proceso

PARAMETROS FIJOS		
Geometría del colector (interna)	Alto(m):	0,15
	Largo(m):	1,5
	Ancho(m):	0,8
Volumen colector	V(m ³):	0,18
Área de Cubierta	A(m ²):	1,2
Ópticas de la cubierta	Transmisibilidad	0,9
	emisividad:	0,88
placa	reflectividad:	0,79
	Absortividad	0,89
	emisividad:	0,95
Propiedades físicas del aire (60°C)	P calorífico (Cp.) (J/Kg*K):	1007
	Densidad(p)kg/m ³ :	1,184
	Vel aire(m/s):	6
Propiedades físicas del agua	Calorífico (Cp.) (J/Kg*K):	4,178
	Densidad(p)kg/m ³ :	995,5

Fuente: Autor, 2019

Los parámetros como el área superficial y el volumen interno están dados por las condiciones de forma del colector solar, debido a que se implementó en un colector ya construido previamente, de igual manera los materiales que determinan la capacidad óptica y térmica del dispositivo como son la cubierta que es de vidrio común y la placa absolvedora de acero galvanizado como se aprecia en la Figura 17 pintada de color negro mate respectivamente.

Las propiedades físico químicas del aire y el agua se tomaron a 60° debido a que esa es la temperatura promedio en la que opera este tipo de sistemas.

4.1.2. prueba experimental

Con el fin de analizar el proceso de transferencia de calor en el interior del colector solar de placa plana (CSP) expuesto a las condiciones atmosféricas de la ciudad de montería y definir el comportamiento de las variables involucradas en el proceso bajo

condiciones reales. por otra parte, brinda condiciones iniciales para la posterior evaluación y validación del modelo analítico planteado haciendo uso de los datos obtenidos.

La prueba se realizó durante un día solar normal en la ciudad de Montería Los resultados obtenidos en dicha prueba tabulados y organizados para su posterior análisis. Se sensoron las temperaturas de tres puntos de interés como son el ambiente, la placa y salida del colector, la lectura de los datos se realizó mediante 3 sensores DTH11 que registraron lectura cada 1 segundo generando así un total de 18000 datos para cada variable.

En este orden de ideas se expuso el colector de placa plana a radiación sin la estrategia de control y con la estrategia obteniendo varias lecturas, como se muestra en la Figura 22:

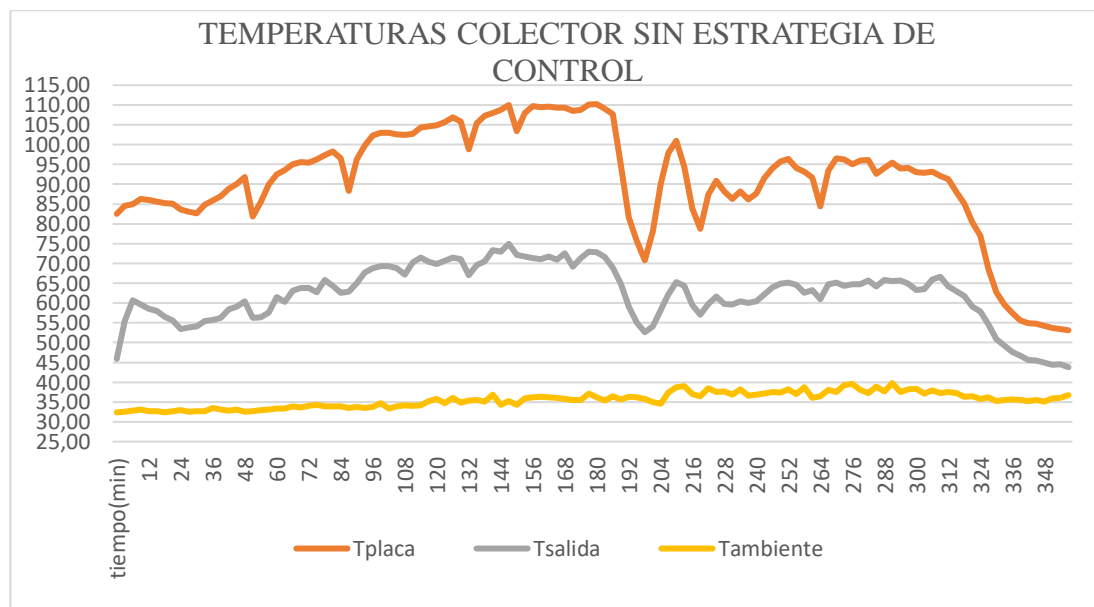


Figura 22. grafica de lectura de temperaturas sin la estrategia de control. Fuente: Autor, 2019

A continuación, en la Tabla 4, se muestra los valores máximos y mínimos que se alcanzaron durante la lectura del día solar sin la implementación de la estrategia de control.

Tabla 4. Datos sin estrategia de control.

	T placa	T salida	T ambiente
máximo	111,20	77,60	43,30
promedio	91,23	62,30	35,55
mínimo	52,70	33,00	30,60
Desviación estándar	13,9061951	7,52817722	2,15376414

Fuente: Autor, 2019

La temperatura de la placa registro durante toda la prueba el mayor valor promedio con $91,23 \pm 13,9^{\circ}\text{C}$ demostrando la capacidad de captación del dispositivo, seguida por la temperatura de salida del colector con $62,3 \pm 7,5^{\circ}\text{C}$ que es la variable que determina la aplicabilidad del dispositivo bajo las condiciones de radiación de la ciudad de Montería. Por último, la temperatura ambiente con $35,55 \pm 2,1^{\circ}\text{C}$ donde se observa una tendencia constante en la temperatura ambiente debido a que la prueba se realizó durante las horas del mediodía, donde las condiciones medioambientales no tienen una significativa variación en un día solar normal es decir que no presente precipitaciones o alta nubosidad.

Se evidencia la relación que existe entre las temperaturas de salida y la placa del colector, debido a el principio de funcionamiento ya que la radiación solar es aprovechada por la placa que a su vez la sede al aire que circula en el interior del colector. Razón por la cual es muy inestable el sistema esto se observa en la gráfica donde se notan subidas y bajones durante toda la prueba para las temperaturas de la placa y la salida del colector; un ejemplo de esto es la fluctuación entre los minutos

180 y 216 de la prueba donde se ve claramente como decaen las temperaturas, y al pasar la perturbación se recupera el sistema.

4.2.Simulación del modelo

Teniendo en cuenta las ecuaciones obtenidas para el modelo propuesto y las condiciones iniciales definidas por la prueba experimental, se construyó un modelo computacional equivalente al modelo planteado para realizar un análisis detallado, mediante una simulación computacional. Para la realización de dicha simulación y prueba del modelo se empleó la herramienta computacional SIMULINK de Matlab como se aprecia en la Figura 23 debido a la simplicidad de su interfaz y la versatilidad en su uso.

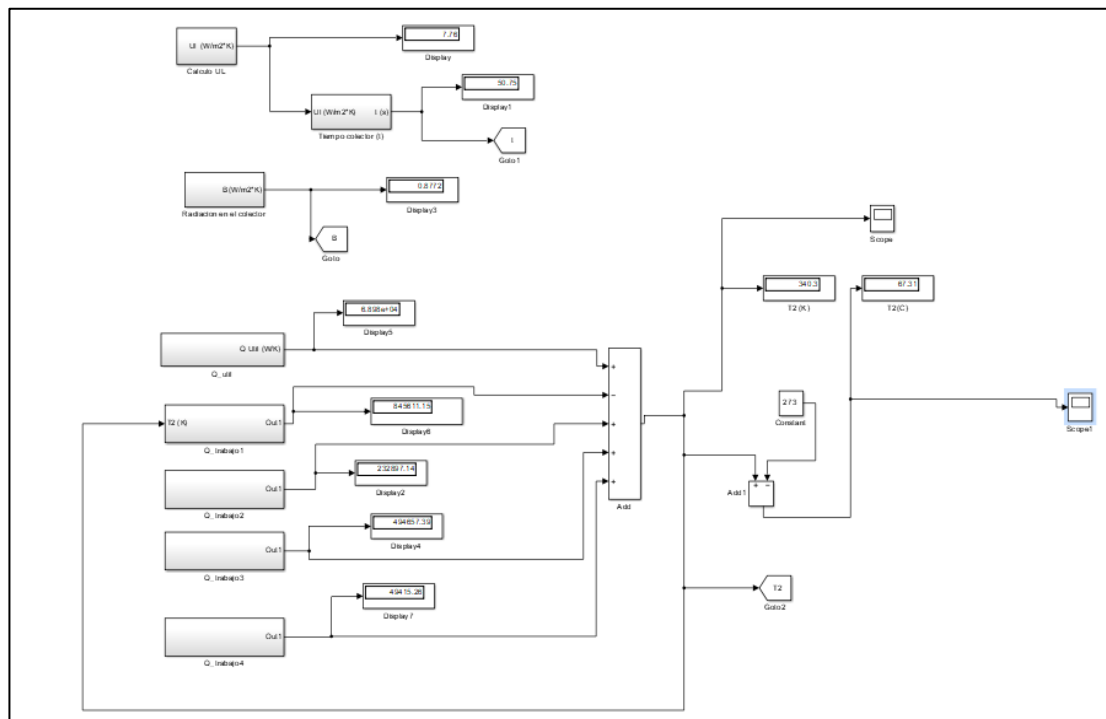


Figura 23 esquema del modelo en Simulink de Matlab.

Fuente: Autor, 2019

Las condiciones iniciales para dicho modelo se definen en función de la prueba experimental por lo que se toma la temperatura ambiente constante de 35°C, como una

función variable de datos aleatorios de $90\pm 20^{\circ}\text{C}$ la temperatura de la placa y con el registro de datos de radiación para el día de la prueba se define la radiación solar del modelo. Los datos obtenidos fueron tabulados y organizados como se observa en la Figura 24 con el fin de generar una representación gráfica de la simulación.

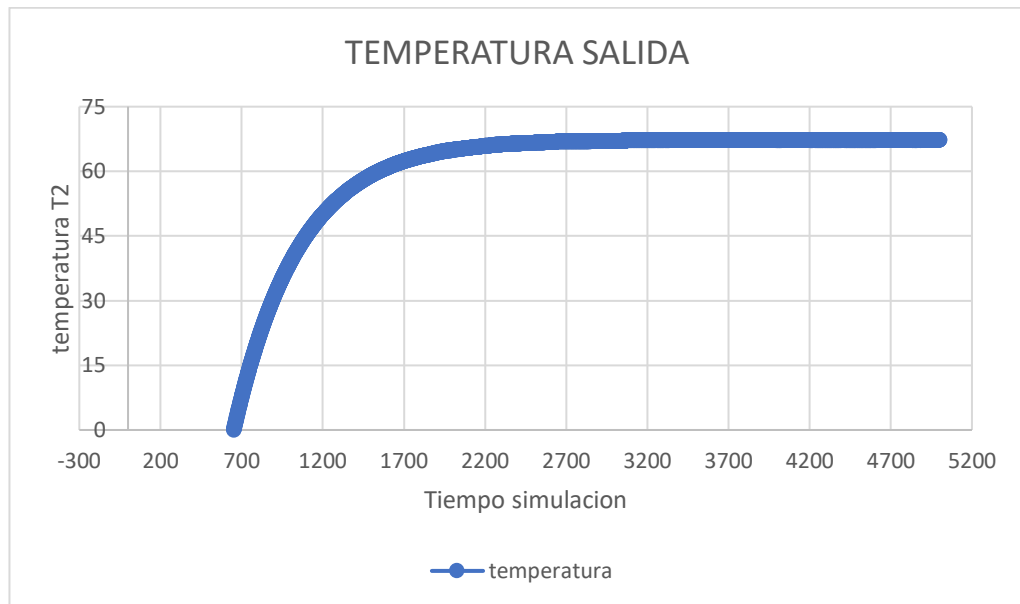


Figura 24 grafico de simulación en Simulink de Matlab.

Fuente: autor, 2019

Se observa que la temperatura de salida para el modelo planteado es de $65\pm 1^{\circ}\text{C}$; el modelo representa una aproximación bastante considerable ya que para la prueba experimental el valor promedio $62,3\pm 7,5^{\circ}\text{C}$ con lo que se pudo constatar un grado de acierto del modelo de un 96% razón por la cual se considera asertivo y que describió el proceso de transferencia de calor que se da al interior del colector.

De la misma forma y durante el mismo tiempo aproximado se tomaron datos de temperatura implementando la estrategia de control gobernada por el modelo realizado en SIMULINK de MATLAB y ejecutado por la tarjeta microcontroladora (Arduino).

Fueron elegidos los datos de un día solar y el día se seleccionó aleatoriamente. Como se aprecia detalladamente en la Figura 25.

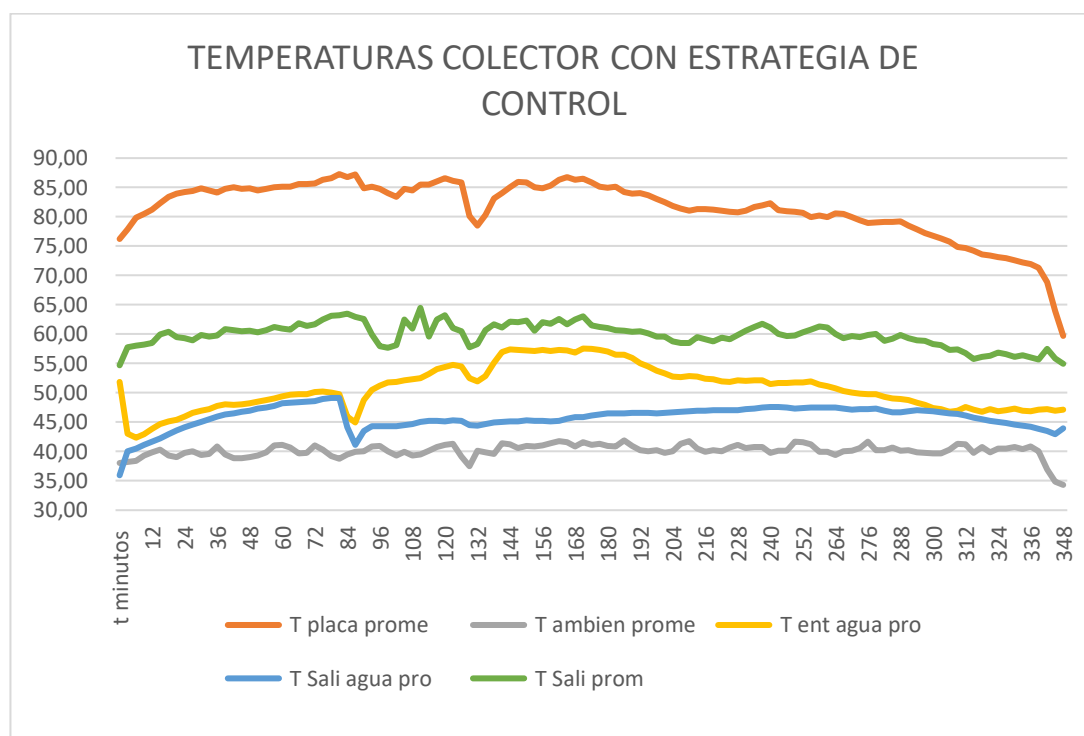


Figura 25 datos con la estrategia de control implementada. Fuente: Autor, 2019

Los datos máximos y mínimos obtenidos durante la lectura del día solar con la estrategia de control implementada se pueden observar en la Tabla 5:

Tabla 5 datos con estrategia de control.

	T placa	T ambiente	T entra agua	T salida agua	T salida
máximo	87,27	41,90	57,55	49,13	64,48
promedio	81,47	40,14	50,75	45,78	59,85
mínimo	59,70	34,31	42,36	35,95	54,69
Desviación estándar	4,8809782	1,1611942	3,7662623	1,98070097	2,0078086

Fuente: Autor, 2019

Los experimentos realizados durante todos los días solares se desarrollaron con una velocidad de flujo de aire promedio de 2,5 m/s dicha velocidad fue medida con un anemómetro digital HP-8665-APP. Siguiendo el orden de las ideas se realizó una superposición de las gráficas de los días aleatorios medidos como se aprecia en la Figura 26, sin la estrategia de control y con la estrategia de control.

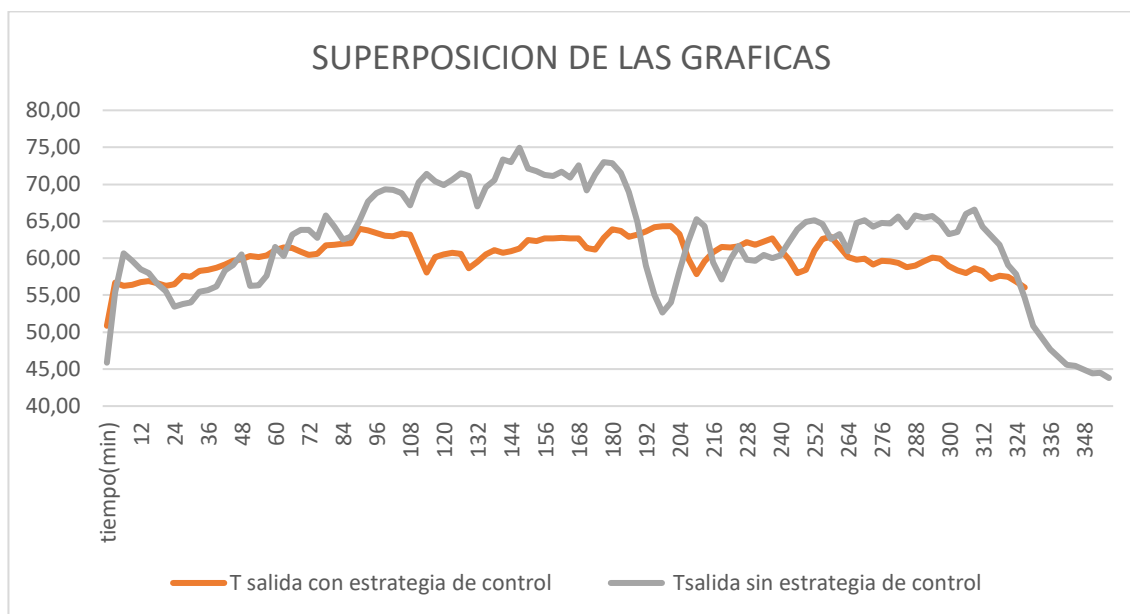


Figura 26 superposición de las gráficas sin estrategia de control y con estrategia de control. Fuente: Autor, 2019

4.3. MARCO DE ANÁLISIS

La información recolectada fue tabulada en una base de datos, haciendo uso del software Microsoft Excel, 2018; posteriormente, se analizó en el Software estadístico libre R. El análisis se organizó siguiendo la ruta que se muestra en la Figura 27.

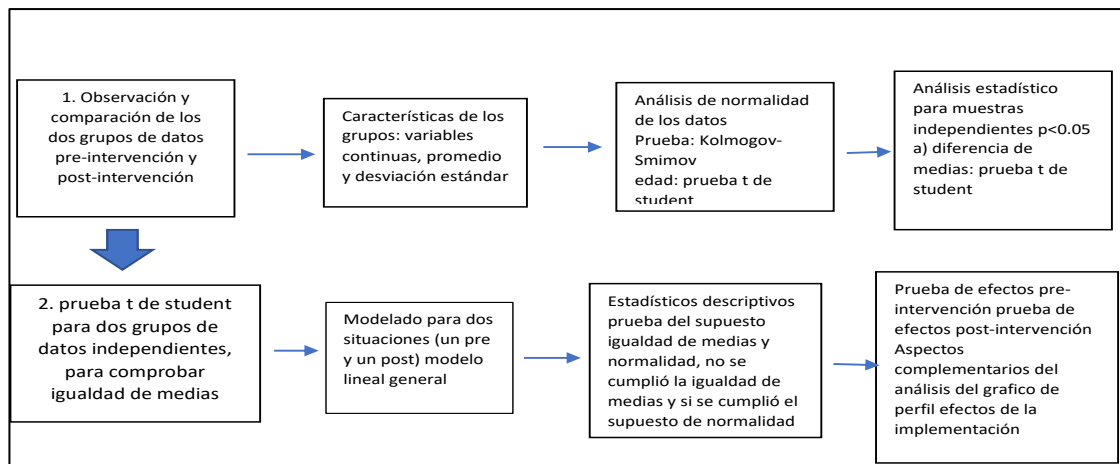


Figura 27 ruta de prueba T-Student. Fuente: Autor, 2019

4.4. PRUEBA DE T-STUDENT

El análisis de los datos del estudio estuvo guiado por la comparación de grupos independientes. Por tanto, en una primera instancia se consideró la prueba de contraste paramétrica t de Student, utilizada para comprobar la igualdad de las medias de dos muestras o una muestra. Para garantizar, en cierto grado la validez de los resultados al hacer uso de pruebas paramétricas, es necesario verificar las siguientes condiciones generales: (1) las variables cuantitativas tienen que ser continuas, (2) cumplir el supuesto de normalidad, es decir, los datos deben seguir una distribución normal, (3) los grupos a comparar deben cumplir el supuesto de homogeneidad de varianza, esto es, igualdad de las varianzas muestrales; respecto la falta de este último supuesto la prueba de t-student se comporta como una buena alternativa, claro está, bajo la verificación previa del cumplimiento de la normalidad.

Por otro lado, las variables de estudio son la temperatura de salida medida antes de aplicar la estrategia (pre-intervención) y después de implementar la estrategia (post-intervención). Debido a que se tomaron lecturas cada diez segundos y el experimento se ejecutó durante al menos cinco horas aproximadamente para un total aproximados

de 1800 datos; lo que llevo a que después de una observación de los grupos de datos se hicieran promedios cada tres minutos y de esta forma obtener un volumen de datos menos robustos y de mayor manejabilidad.

La hipótesis nula que se contrastó fue: la temperatura de salida del colector solar de placa plana post-intervención es igual a la temperatura de salida pre-intervención.

Para reproducir los datos en editor de R se crearon dos variables: una para definir los valores del grupo post-intervención y otro para definir los valores del grupo pre-intervención. A partir de los datos se generó la tabla que muestra valores para las estadísticas descriptivas (máximo, mínimo, promedio, desviación estándar, coeficiente de variación) que permitieron caracterizar cada uno de los grupos en estudio.

Respecto la verificación de supuestos para la prueba *t-student*, en este estudio se tomó la modificación del *Kolmogórov-Smirnov* conocida como test *Lilliefors*, para realizar la prueba de normalidad. El test *Lilliefors* asume que la media y varianza son desconocidas, estando especialmente desarrollado para contrastar la normalidad, cuando el número de observaciones es mayor de 50. Para su aplicación en el software R se implementó la función *lillie.test ()* del paquete *nortest*. Por otra parte, para la verificación del supuesto de homogeneidad de varianza se implementó la prueba de Bartlett, la cual permite contrastar la igualdad de varianza en 2 o más poblaciones sin necesidad de que el tamaño de los grupos sea el mismo, siendo esta la mejor opción si se está seguro de que los datos provienen de una distribución normal. Para su aplicación en el R, se efectuó la función *Bartlett. Test ()*.

Seguidamente se realizó la *t-student*, utilizando la función *t.test ()* asumiendo varianzas diferentes, y un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ (probabilidad (α) de rechazar una hipótesis nula que es en realidad verdadera asumiendo erróneamente que la

intervención ha producido un efecto) fijado a priori por el investigador para todos los contrastes en el presente estudio ($\alpha = 0,05$ p < 0,05).

Finalmente analizando los resultados encontrados en la prueba t-student, se reflexiona sobre los valores hallados para la estadística coeficiente de variación (CV) de cada grupo en estudio. Conocida como la variación ambicionada de un conjunto de datos, respecto a la media aritmética, utilizada siempre que se espera hacer referencia a la correspondencia entre la variabilidad de alguna variable y el tamaño de la media; se calcula a modo de desviación típica fraccionada por la media.

4.5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE PRUEBA DE HIPÓTESIS

4.5.1. Características de grupos

En la

Tabla 6 se observa que la temperatura de salida promedio post-intervención es menor, no siendo este valor muy alejado de la temperatura promedio observada en la pre-intervención, adicionalmente se puede notar que la desviación estándar disminuyó significativamente en la post-intervención.

La temperatura de salida promedio medida en la pre-intervención fue de 62,30 con un intervalo de confianza (IC) del 95% (60,88 – 63,55). Mientras que en la temperatura de salida promedio medida post-intervención fue 59,85 con un IC de (59,49 – 60,22); analizando los límites de los respectivos IC se puede inferir que al no interceptarse existen diferencias significativas entre los promedios de los grupos estudiados.

Tabla 6. Estadísticas de resumen para la variable temperatura de salida.

Grupos	Tamaño de muestra	máx.	mín.	Prom.	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Pre-intervención	120	77,6	33	62,3	7,53	12%
Post-intervención	117	64,48	54,69	59,85	2,01	3%

Fuente: Autor, 2019

4.5.2. Prueba de hipótesis

Para la realización de la prueba t-Student para comparación de grupos independientes es necesario corroborar la bondad de ajuste de la misma, para ello se verifican los supuestos de distribución normal o aproximadamente normal y conocer si las varianzas poblacionales son pueden ser o no asumidas iguales.

Respecto con la normalidad de las distribuciones de los datos se corroboran las siguientes hipótesis nula: la distribución de las mediciones de la temperatura de salida pre-intervención (post-intervención) es normal. Empleando la modificación de Lilliefors a la prueba de Kolmogorov, en relación al grupo pre-intervención se obtuvo un estadístico de prueba $D = 0.077$ con un p valor asociado de 0.079 siendo este mayor al nivel de significancia ($p > 0.05$) se tiene el no rechazo de la hipótesis nula, es decir, se cumple el supuesto de normalidad para las observaciones pre-intervención; asimismo para el grupo post-intervención el estadístico de prueba obtenido fue $D = 0.0067$ con un p valor asociado de 0.2132 siendo este mayor al nivel de significancia ($p > 0.05$) no se rechazó la hipótesis nula, es decir, se cumple el supuesto de normalidad para las observaciones pre-intervención.

Mientras que, para llevar a cabo la verificación del supuesto de homogeneidad de varianza, se corrobora la hipótesis nula: la varianza de los grupos pre-intervención y post-intervención son iguales. Implementando la prueba de Bartlett se obtuvo un valor

de estadístico de prueba de $B = 157.82$ con un p valor asociado aproximado a cero siendo este mucho menor que el nivel de significancia ($p < 0.05$) lo que llevo al rechazo de la hipótesis de homogeneidad de varianza, implicando que se debe asumir varianzas diferentes.

Dadas las condiciones anteriores se procedió a realizar el análisis de comparación de los grupos independientes, asumiendo varianzas diferentes; para esto se realizó una prueba t que permite contrastar la hipótesis nula (no existen diferencias) referida a los efectos de la intervención, en donde se obtuvo un estadístico de prueba $t = 3.3827$ con un p valor asociado de 0.0009361 siendo este menor al nivel de significancia ($p < 0.05$) se concluye que existen diferencias estadísticamente significativas, entre la temperatura de salida post-intervención y la temperatura de salida pre-intervención.

Por último, habiendo hallado diferencias significativas entre los grupos en estudio, y teniendo en cuenta que el coeficiente de variación de las observaciones medidas pre-intervención fue de 12%, mientras que en la medidas post-intervención fue de 3%, se conjeturar que el aplicar la estrategia de control si tuvo un efecto positivo en la disminución en la variabilidad de la temperatura de salida, además del control de los límites de la temperatura de salida promedio.

Lo que lleva a concluir que la estrategia de control si genera cambios positivos en cuanto al gobierno de la temperatura de salida.

5. CONCLUSIONES

Se determinaron los parámetros de funcionamiento y la función de transferencia que rige el comportamiento del calor dentro del colector solar de placa plana para la mantención de la temperatura dentro del rango establecido $60^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ basados en el método de ZIEGLER Y NICHOLS.

Se calculo y construyo el sistema físico que se empalmo con el software Simulink de Matlab y de donde se programó la función de transferencia que permite mantener la temperatura en la salida dentro del rango, cumpliendo así con los requerimientos planteados inicialmente.

El sistema de control diseñado resulto en una mejoría significativa con respecto al dispositivo de calentamiento sin sistema de control, lo cual se evidencia en la disminución del coeficiente de variación de un 12% en el colector sin estrategia de control a un 3% con la implementación de la estrategia de control.

El conjunto de elementos en su totalidad es sencillo de manipular lo que facilita el mantenimiento de los diversos elementos que lo conforman, solo se deben tener en cuenta medidas básicas de seguridad para la instalación y operación del colector solar de placa plana con su respectiva estrategia de control.

6. RECOMENDACIONES.

Las recomendaciones para futuros experimentos que requieran de un colector solar de placa plana con un sistema de enfriamiento o calentamiento son las siguientes:

Revisar y limpiar a cada hora la cubierta del colector para que no haya disminución en la incidencia solar debido a polvo o cualquier otro tipo de impurezas.

Verificar que la posición del colector no quede afectada por alguna sombra a través del día debido al movimiento de la tierra con respecto al sol, ya que con el paso del día las sombras van cambiando.

Revisar que el reservorio de agua no tenga impurezas que obstruyan el paso del fluido por las electroválvulas y tuberías.

Revisar que el sistema de alimentación de agua este siempre dispuesto a suministrar dependiendo la necesidad ya que si el agua no está en el momento de la necesidad se generaran fallas.

Revisar las conexiones, proteger el cableado y el Arduino de posible humedad para evitar algún daño eléctrico

7. BIBLIOGRAFÍA

- Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística., & Asociación Nacional de Industriales. (2017). *Guía industrial de Colombia*.
- DECO. (2016). Sistemas Solares Térmicos. In *Proteste*. <https://doi.org/10.1145/2505515.2507827>
- Delgado Aguilera, E. (2007). *Diseño, Construcción Y Evaluación De Tres Colectores Solares Térmicos Parte 1: Estado Del Arte*. (6).
- DNP. (2016). Pérdida y Desperdicio. *Ria*, 39, 116.
- FAO. (2016). Pérdida y Desperdicio de alimentos. In *Ria* (Vol. 39). Retrieved from https://mrv.dnp.gov.co/Documentos/Interes/Perdida_y_Desperdicio_de_Alimentos_en_colombia.pdf
- GUTIÉRREZ, O. H., & MEJÍA, C. J. H. (2017). *estudio de la viabilidad tecnica y economica para la implementacion de un sistema de energia solar fotovoltaica de 10KW, caso hospital local de tenerife, magdalena*. 549, 40–42.
- Martinez, J., Franco, P., & R. Alonso. (2013). *Manual Técnico de Energía Solar Térmica Volumen II: Aspectos Técnicos y Normativos Sobre este volumen*.
- ONUDI. (2016). Observatorio De Energia Renovable Para America Latina Y El Caribe. 2016, 1.
- Rodríguez, R., Olvera, C., Dorrbercher, S., Araíza, M., & Monteagudo, F. (2016). *APLICACIONES INDUSTRIALES Diseño de un colector solar de placa plana Design of a solar flat plate collector*. (1), 15–24.
- Torres-Gallo, R., Miranda-Lugo, P. J., & Martínez-Padilla, K. A. (2018). Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca. *Tecnológicas*, 20(39), 69–81. <https://doi.org/10.22430/22565337.693>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. In *Ministerio de Minas y Energía*. <https://doi.org/10.1021/ja304618v>
- Viviana, Lady. (2016). *ALTERNATIVA EN EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR ANTE CRISIS ENERGÉTICA EN COLOMBIA PRESENTADO POR: LADY VIVIANA PINZÓN ARÉVALO Profesional en Química UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTEGRAL DE LOS REC.* Retrieved from <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/15275/3/PinzonArevaloLadyViviana2016.pdf>